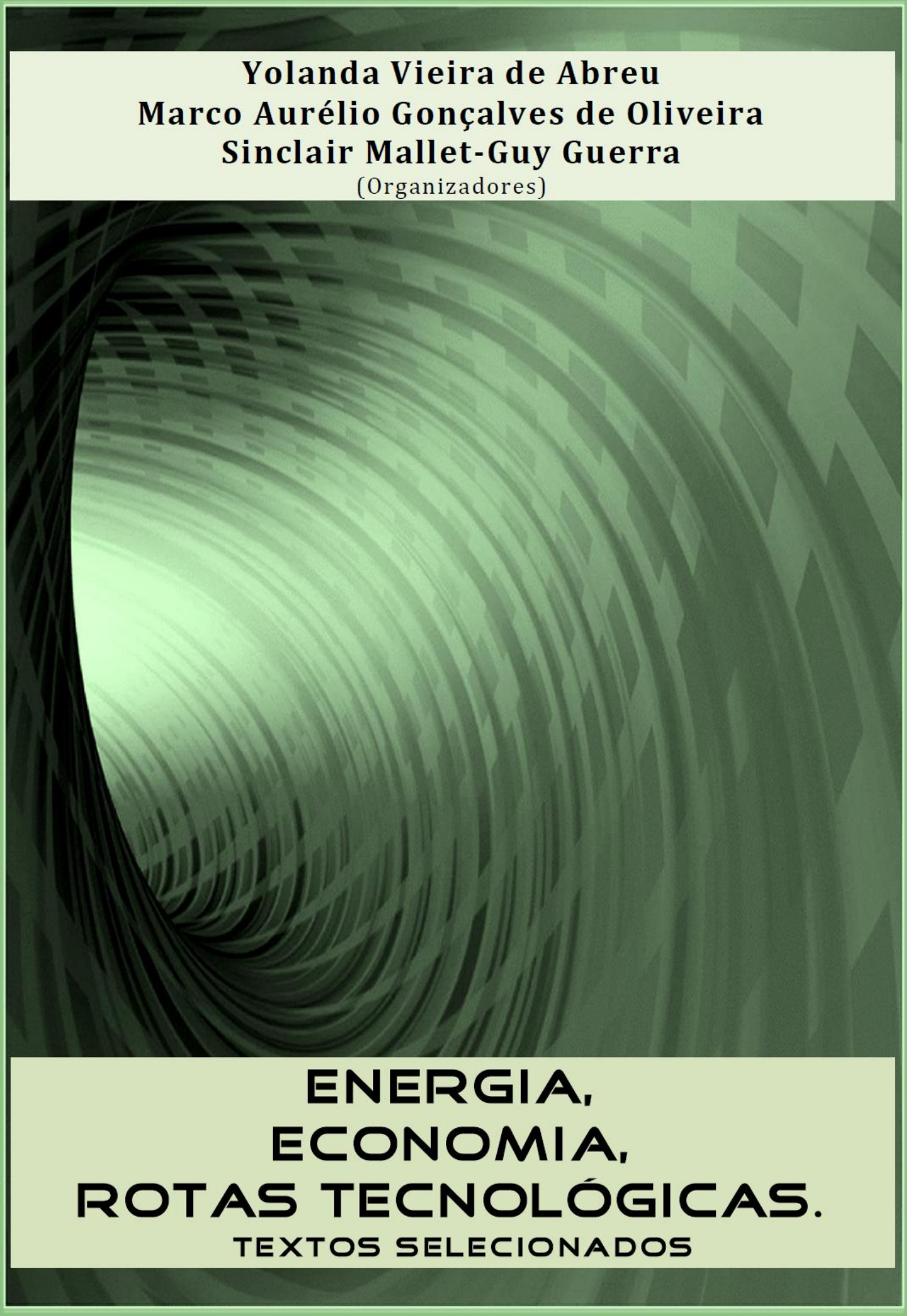
Yolanda Vieira de Abreu
Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira
Sinclair Mallet-Guy Guerra
(Organizadores)



ENERGIA, ECONOMIA, ROTAS TECNOLÓGICAS.

TEXTOS SELECIONADOS

Yolanda Vieira de Abreu
Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira
Sinclair Mallet-Guy Guerra
(Organizadores)

Energia, Economia, Rotas Tecnológicas.
Textos selecionados

Palmas - TO
Brasil - 2010

“ENERGIA, ECONOMIA, ROTAS TECNOLÓGICAS. TEXTOS SELECIONADOS”

Publicado por:eumed.net .

Universidad de Málaga. Málaga. Espanha. 2010

ISBN: 978-84-693-6489-5

Nº Registro Biblioteca Nacional de Espanha: 10/96106

http://eumed.net/libros/2010e/827/index.htm

Consejo Editorial: http://www.eumed.net/libros/consejo.htm

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E56 Energia, economia, rotas tecnológicas. Textos selecionados / organizadores: Yolanda Vieira de Abreu, Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, Sinclair Mallet Guy Guerra. - Málaga, Espanha: Eumed.Net, Universidad de Málaga, 2010.
330 p.: il.

ISBN: 9788469364895

1. Economia de energia . 2. Rotas Tecnológicas . 3. Produção de Energia. I. Abreu, Yolanda Vieira de(org.) . II. Oliveira, Marco Aurélio Gonçalves de (org.). III. Guerra, Sinclair Mallet Guy (org.). Título.

CDD 333.7915

Aos

Nossos Pais, Filhos e

Netos.

AGRADECIMENTOS

À família, aos amigos e aos nossos alunos de Graduação, Mestrado e Doutorado.

Organizadores

Profª. Drª. Yolanda Vieira de Abreu

Departamento de Economia e Mestrado em Agroenergia

Núcleo em Interunidades em Desenvolvimento

Econômico, Social e Energético - UFT –TO.

Palmas/TO, Brasil

yolanda@uft.edu.br

Prof. Dr. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Elétrica – GSEP/ UnB

Brasília/BRA, Brasil

mago@ene.unb.br

Prof. Dr. Sinclair Mallet-Guy Guerra

Departamento de Energia - PPGE/IEE/USP.

São Paulo/SP, Brasil.

sguerra@iee.usp.br

AUTORES POR INSTITUIÇÃO

Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia (UnB/FT/ENE)

Departamento de Engenharia Elétrica. Grupo de Sistemas Elétricos de Potência (GSEP).

Prof. Dr. Ivan Marques de Toledo Camargo

Prof. Dr. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira

Prof. Dr. Mauro Moura Severino

Doutorando (UnB/FT/ENE):

Rafael Amaral Shayani

Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Energia

Departamento de Energia - PPGE/IEE/USP.

Prof. Dr. Arlindo Kamimura

Prof. Dr. Geraldo F. Burani

Prof. Dr. Sinclair Mallet-Guy Guerra (Livre Docente)

Universidade Federal do Tocantins (UFT)

Programa de Pós-Graduação em Agroenergia

Prof. Dr. Joel Carlos Zukowski Junior

Prof. Dr. Juan Carlos Valdés Serra

Prof[a] Dr[a] Yolanda Vieira de Abreu

Mestrandos (as) em Agroenergia (UFT):

Aymara Gracielly Nogueira Colen Fritz

Evandro Reina

Fábio Josias Farias Monteiro

Glecymara Sousa Gomes

Marco Antônio Baleeiro Alves

Maria Alzira Garcia de Freitas

Maristhela Ramos da Silveira

Thiago Magalhães de Lázari

"Só um sentido de invenção
e uma necessidade intensa de criar
levam o homem a revoltar-se,
a descobrir e a descobrir-se com lucidez".

Pablo Picasso

SUMÁRIO

À GUISA DE PREFACIO 13

CAPITULO I 18

TECNOLOGIA APROPRIADA: INSTRUMENTO DE DESENVOLVIMENTO DA AGRICULTURA FAMILIAR E DE COMUNIDADES RURAIS. 19

1.1 INTRODUÇÃO 19
1.2 TECNOLOGIA APROPRIADA: DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS 21
1.3 ESTADO DO TOCANTINS 23
1.4 EXPERIÊNCIAS COM TECNOLOGIAS APROPRIADAS NO ESTADO DO TOCANTINS 24
1.4.1 Projeto Quintal Verde 24
1.4.2 Funcionamento do Sistema Mandala 26
1.4.3 Implantação das Hortas 28
1.4.4 Resultados do Projeto Quintal Verde 35
1.5 BIODIGESTORES 36
1.5.1 Modelos e Funcionamento 38
1.5.2 Construção e Manutenção do Biodigestor 42
1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 44

CAPITULO II 48

UTILIZAÇÃO DE BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PROPRIEDADES AGRÍCOLAS. 49

2.1 INTRODUÇÃO 49
2.2 PEQUENAS CENTRAIS TERMOELÉTRICAS A BIOMASSA 53
2.3 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO 55
2.4 DESCRIÇÃO DA PLANTA DE COGERAÇÃO 56
2.5 MONTAGEM E INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE COGERAÇÃO 58
2.6 OPERAÇÃO DA CALDEIRA 59
2.7 AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO SISTEMA DE COGERAÇÃO 61
2.7.1 Fatores Econômicos 62
2.7.2 Centrais Termelétricas 64
2.7.3 Viabilidade Econômica 64
2.7.4 Investimento Inicial 64
2.7.5 Custos Anuais com Operação e Manutenção 65
2.7.6 Custo do Combustível 65
2.7.7 Venda de Energia Elétrica 65
2.7.8 Financiamentos 66
2.7.9 Valor Presente Líquido (VPL) 67
2.7.10 Análise de Sensibilidade 67
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS 71

CAPITULO III **77**

IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO **78**
3.1 INTRODUÇÃO 78
3.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (GD) 80
3.2.1 Definição de GD 80
3.2.2 Localização da GD 80
3.2.3 Modificação do Fluxo de Potência em Sistemas Radiais de Distribuição 82
3.2.4 Exemplo de Fluxo de Potência em Sentido Reverso 83
3.2.5 Instrumentos Normativos 85
3.3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS (GDFV) 86
3.3.1 Crescimento da Utilização da GDFV 86
3.3.2 Configurações da GDFV 87
3.3.3 Exemplo de Cálculo do Potencial da GDFV 88
3.3.4 Conexão da GDFV à Rede Elétrica 89
3.4 IMPACTOS DA GD NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO 90
3.4.1 Distorção Harmônica 91
3.4.1.1 Limite de Distorção Harmônica de Corrente 91
3.4.1.2 Atuação como Filtros Ativos de Distorção Harmônica 92
3.4.2 Aumento de Tensão 92
3.4.2.1 Efeito da Impedância do Alimentador no Aumento de Tensão 92
3.4.2.2 Fatores que Influenciam o Aumento de Tensão 95
3.4.3 Carregamento de Alimentadores e Transformadores 95
3.4.4 Contribuição para a Corrente de Curto-circuito 97
3.4.5 Comportamento da GD perante Distúrbios na Rede de Distribuição 97
3.4.5.1 Efeito da Desconexão da GD no Perfil de Tensão do Alimentador 97
3.4.5.2 Curva de Suportabilidade da GD frente a Afundamentos de Tensão 98
3.4.6 Ilhamento Não-intencional 99
3.5 Limite de Penetração para GD 100
3.5.1 Definição de Penetração da GD 100
3.5.2 – Percepções Sobre o Limite de Penetração da GD 101
3.5.3 Recomendações Gerais 103
3.5.4 – Aumento da Penetração da GD 103
3.5.4.1 Controle Centralizado da GD e de Regulares de Tensão 104
3.5.4.2 Opções para Aumentar a Penetração da GD 105
3.5.5 – Benefícios Adicionais da Penetração Elevada de GD 106
3.5.6 – Pesquisas Adicionais 107
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 108

CAPITULO IV **111**

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: DISCUSSÃO CONCEITUAL E NOVA DEFINIÇÃO **112**
4.1 INTRODUÇÃO 112
4.2 CONCEITO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA 113
4.2.1 Conceitos, Definições e Classificações Pertinentes 113
4.3 OUTROS CONCEITOS 149
4.3.1 Recursos Distribuídos 149
4.3.2 Capacidade Distribuída 150
4.3.3 Serviço de Eletricidade Distribuído 151

4.4 ASPECTOS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO 151
4.5 ASPECTOS DE CONEXÃO 152
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 153

CAPITULO V 158

GERAÇÃO DE ENERGIA EM COMUNIDADES ISOLADAS: CASO DA COMUNIDADE BOA ESPERANÇA 159
5.1 INTRODUÇÃO 159
5.2 LOCALIZAÇÃO 163
5.3 CRITÉRIOS DE DECISÃO SOBRE O SISTEMA DE GERAÇÃO 164
5.4 DEMANDA DE ENERGIA 166
5.5 TIPOS DE ENERGIA E USOS 166
5.6 SITUAÇÃO SÓCIO ECONÔMICA DAS FAMÍLIAS DA COMUNIDADE 168
5.7 IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO HÍBRIDO 168
5.7.1 Evolução da Instalação 168
5.7.2 Primeira Reunião com a Comunidade, Levantamento Georeferenciado da Comunidade 168
5.7.3 Instalação do Sistema de Geração de Energia Elétrica Híbrido 169
5.7.4 Instalação da Casa de Farinha 172
5.7.5 Custo da Geração e Distribuição (kWh) 174
5.7.6 Gestão do Sistema 175
5.8 SUSTENTABILIDADE 175
5.8.1 Preço do Serviço X Capacidade de Pagamento 175
5.8.2 Impacto Sobre a Renda Local, Empregos Diretos e Indiretos a Partir da Implantação da Micro Usina 177
5.8.3 Análise de Viabilidade Econômica 178
5.8.4 Replicabilidade do Modelo de Geração 179
5.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS 180

CAPITULO VI 182

POSSIBILIDADES TECNOLÓGICAS DE APROVEITAMENTO DA BIOMASSA PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS 183
6.1 INTRODUÇÃO 183
6.2 BIOMASSA 184
6.2.1 Disponibilidade e Consumo da Biomassa e Aproveitamento dos seus Resíduos para Produção de Biocombustíveis 186
6.3 TECNOLOGIAS CONVENCIONAIS E BIOLÓGICAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL 188
6.3.1 Combustão Direta 191
6.3.2 Pirólise ou Carbonização 192
6.3.3 Gaseificação 195
6.3.4 Fermentação 199
6.3.5 Transesterificação 200
6.4 PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL 201
6.5 POTENCIALIDADES DAS MATÉRIAS PRIMAS POR REGIÃO 203
6.5.1 Oleaginosas 205
6.5.1.1 Amendoim 205
6.5.1.2 Soja 205
6.5.1.3 Dendê 206

6.5.1.4 Girassol 207
6.5.1.5 Babaçu 207
6.5.1.6 Macaúba 208
6.5.1.7 Microalgas 208
6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 209

CAPÍTULO VII 214

BASES TECNOLÓGICAS DA OBTENÇÃO DE BIODIESEL 215
7.1. INTRODUÇÃO 215
7.2. TECNOLOGIAS DE OBTENÇÃO DE BIODIESEL: UMA REVISÃO. 216
7.2.1 Composição Química de Óleos Vegetais e Animais 216
7.2.2 A Reação de Transesterificação 219
7.2.3 O Uso de Álcoois e Co-solventes 222
7.2.4 Métodos de Obtenção de Biodiesel 223
7.2.5 Possíveis Catalisadores para Obtenção do Biodiesel 224
7.3 PRINCIPAIS ETAPAS PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL 232
7.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 233

CAPITULO VIII 237

SOBRE O CONSUMO DE LENHA DOMICILIAR RURAL NAS REGIÕES BRASILEIRAS 238
8.1. INTRODUÇÃO 238
8.2. MATERIAIS E MÉTODO 240
8.2.1. Hipóteses adotadas 240
8.2.2. Resultados a partir da POF 2002 e POF 2008 241
8.3. CONCLUSÃO 244

CAPITULO IX 246

ESTUDO SOBRE AS VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA GASOLINA, ETANOL E A MISTURA DOS DOIS COMBUSTÍVEIS EM MOTORES FLEX FUEL 247
9.1 INTRODUÇÃO 247
9.2 BIOCOMBUSTÍVEIS E A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA BRASILEIRA . 251
9.3 MATERIAIS E MÉTODOS 254
9.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 254
9.4.1 Motor de Combustão Interna 254
9.4.2 Rendimento Etanol *versus* Gasolina 256
9.4.3 Poder Calorífico 258
9.4.4 Octanagem 258
9.4.5 Calor de Vaporização 258
9.4.6 Proporção Estequiométrica 259
9.4.7 Ponto de Fulgor 259
9.5 CÁLCULO DE RENDIMENTO ETANOL *VERSUS* GASOLINA 260
9.5.1 Vantagens e Desvantagens da Utilização de cada Combustível 260
9.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 261

CAPÍTULO X 265

FONTES E TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA ATENDIMENTO A COMUNIDADES ISOLADAS 266
10.1 INTRODUÇÃO 266
10.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA 271
10.2.1 Aspectos Gerais da Energia Solar 271
10.2.2 Energia Solar-fotovoltaica 274
10.2.3 O Efeito Fotovoltaico 282
10.2.4 O Aproveitamento da Luz Solar 284
10.2.5 Tecnologias Fotovoltaicas Comercialmente Disponíveis 287
10.2.5.1 Aspectos Gerais 287
10.2.5.2 Tecnologia de Silício Cristalino (c-Si) 288
10.2.5.3 Tecnologia de Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si) 290
10.2.5.4 Tecnologia de Telureto de Cádmio (CdTe) 293
10.2.5.5 Tecnologias CIS e CIGS 293
10.2.6 Características Elétricas de Células e Módulos Fotovoltaicos 293
10.2.7 Sistema Fotovoltaico Autônomo 295
10.2.7.1 Aspectos Gerais 295
10.2.7.2 Potência e Energia Geradas 298
10.3 CÉLULAS A COMBUSTÍVEL 300
10.3.1 Aspectos Gerais 300
10.3.2 Componentes Básicos e Princípio de Funcionamento 303
10.3.3 Aspectos Positivos e Negativos 307
10.4 TECNOLOGIAS 310
10.4.1 CaC Alcalina (AFC) 313
10.4.2 CaC de Membrana Polimérica (PEMFC) 313
10.4.3 CaC Ácida (PAFC) 314
10.4.4 CaC de Carbonato Fundido (MCFC) 315
10.4.5 CaC de Óxido Sólido (SOFC) 316
10.4.6 CaC de Óxido Sólido de Temperatura Intermediária (ITSOFC) 317
10.4.7 CaC de Metanol Direto (DMFC) 317
10.4.8 CaC de Etanol Direto (DEFC) 318
10.5 SISTEMAS À BASE DE CACS 318
10.5.1 Processador de Combustível 319
10.5.2 Pilha de células 319
10.5.3 Condicionador de Potência 320
10.5.4 O Hidrogênio como Combustível das CaCs 320
10.5.5 Sistemas Móveis e Estacionários 321
10.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 322

À GUISA DE PREFACIO

Para se entender o que se passa no mundo acadêmico é necessário, antes de tudo, compreender um pouco de semântica, dado que sua aplicação é útil em toda e qualquer ciência. Um exemplo disso é a interpretação de três palavras aparentemente semelhantes, mas que leva a diferentes compreensões quando aplicadas.

Alterar pode ser entendido como aquela palavra que não interfere total e radicalmente nas frases, mas que pode ser usada como sinônimo, complemento de frases, ênfase ou reforço frasístico sem grande modificação ou transformação em seu sentido. Modificar é diferente por conter o objetivo claro e específico de apresentar outra conotação em suas aplicações, utilizações e aqui já levam a frase ou texto a outro sentido sem, contudo, transformá-la completamente. Finalmente, transformar tem um sentido mais forte, mais amplo. Sua aplicação é dirigida diretamente para outro espaço interpretativo. Como exemplo pode-se aplicar estas três palavras em ciências. O calor altera a temperatura dos corpos. Caso suba, pode modificar sua forma, por exemplo. Atingindo limites elevados (para tais corpos) podem transformá-los quanto à forma, cor e textura.

No Brasil, desde a metade da década de 1990 os estudos sobre planejamento foram sendo alterados, sobretudo e de forma especifica o referente a energia em função da predominância do mercado como o novo elemento determinador de ações. Primeiramente, passou-se a discutir a questão da interdisciplinaridade, fragilizando-se a busca feita décadas anteriores de que em energia não há uma disciplina predominante tamanhas são as intercorrências entre umas e outras. A foragem de um de poço de petróleo tem início pelos estudos sísmicos, passa pela Economia por causa das necessidades dos investimentos requeridos e dos custos decorrentes, deve atender a Química para avaliação das repercussões nesse campo. A sociedade precisa saber qual será o impacto sobre aglomerados humanos, para isso faz-se necessária a busca de esclarecimentos a respeito das questões ambientais incorridas, a montante e a jusante, hoje e no futuro.

As modificações sobre tais estudos foram sendo introduzida, principalmente, pela não compreensão dessas necessidades interpretativas. O *sprit-de-corp* de recém doutores os leva a

buscar mais força na coesão de seu grupo, procurando o distanciamento de toda e qualquer intromissão que poderia fragilizá-la. O solido conhecimento *em si*, ou seja, o completo domínio de sua formação científica e tecnológica os distancia totalmente de uma visão moderna em que se deve buscar uma amplitude maior de conhecimentos.

Não se está defendendo a hipótese de que compreender as modernas teorias sobre desenvolvimento representa uma afirmação do sistema econômico vigente no mundo atualmente. Não se está impondo que um formado em uma disciplina deva dominar com profundidade todos os conceitos, regras e normas operacionais de outra.

Entre economistas, por exemplo, advoga-se no presente a visão denominada *pluralista* a qual preceitua uma abordagem ampla de interpretação de relações econômicas indo daquilo que popularmente é rotulado de visão conservadora até o outro extremo em que se alojam pensadores considerados heréticos. A síntese interpretativa dessas correntes vai propiciar o melhor e mais amplo domínio da teoria econômica necessária à compressão de seus fenômenos. Esse mesmo economista não pode prescindir de conhecer, por exemplo, fenômenos termodinâmicos ainda que sejam seus rudimentos básicos. Por outro lado, as várias modalidades de engenharia não podem e não devem prescindir de conhecimentos sobre investimentos, custos e os reflexos de suas atividades na sociedade. Como um exemplo tendendo ao banal, em uma conturbação como a da cidade de São Paulo, pode-se verificar o peso da interdisciplinaridade quando se trabalha na tentativa de solucionar problemas decorrentes de melhorias no transporte. Uma pletora de conhecimentos específicos é acionada. Entram nessa equipe solucionadora técnicos, e mesmo cientista, das mais variadas modalidades com um único e definido objetivo: atender as necessidades sociais.

Em questões sobre energia dá-se o mesmo. Ocorre que em função das transformações resultantes do processo de globalização dos sistemas financeiro e produtivo a ciência e a tecnologia caminham na mesma direção, muitas vezes a reboque, mas na maioria das vezes conduzindo o processo. Dentro dessa forma de ver as relações sociais decorrentes encontram-se os *encastelamentos deformadores*. Compreenda-se por isso a visão predominante em meios acanhados tecnicamente, ou seja, aqueles que não conseguem ver que nesse mesmo mundo moderno em que prevalecem as leis de mercado seu produto é menor por ser restrito tal qual os óculos que só se adéquam à visão de seu utilizador. Ficam faltando complementarmente

conhecimentos mais amplos, não como finalizadores do trabalho ou da atividade desenvolvida, mas sim da necessidade de outros profissionais participes dessas mesmas, de forma conjunta e nunca excludente.

Os trabalhos apresentados nesta obra, resultado das atividades profissionais de seus autores – todos eles ligados a academia – procuram se enquadrar em uma forma moderna de se ver a energia de maneira interdisciplinar. São engenheiros de variadas modalidades, são economistas com suas interpretações distintas, são cientistas sociais aos quais não escapam uma visão específica pelo seu caráter regional, são físicos preocupados com interpretações equivocadas.

Antes de se abrir os comentários, sobre os artigos aqui apresentados, é conveniente ressaltar a predominância de seu caráter regional. A permanência desse caráter tratando de casos ou aplicando esquemas tecnológicos a comunidades isoladas deve-se ao fato de seus autores estarem ligados a vida acadêmica daquela parte que já foi chamada de o "*Brasil profundo*" (com a permissão de mestre Sérgio Buarque de Holanda).

O primeiro dos artigos desta coletânea já deixa clara essa visão ampla por abordar tecnologia com pinceladas de ciências sociais sem que uma delas seja a predominante tamanha é sua imbricação. Dessa forma "*Tecnologia apropriada: Instrumentos de desenvolvimento da agricultura familiar e de comunidades rurais*" de autoria de Reina, Monteiro, Lázari e Abreu têm, como explicitado em seu título o "*objetivo (de) apresentar a tecnologia apropriada e sua importância para o crescimento e desenvolvimento da agricultura familiar e de pequenas comunidades rurais*".

Em "*Utilização de biomassa para geração de energia elétrica em propriedades agrícolas*" toma-se conhecimento do esforço que o uso da biomassa transfere à sociedade no sentido de ampliar suas opções de consumo de outras fontes e formas de energia. Mais uma vez, percebe-se nesse trabalho a visão interdisciplinar ao justapor engenharia elétrica com rudimentos de engenharia agronômica e com sociologia agrícola ao se debruçar sobre propriedades agrícolas.

O terceiro artigo leva, indiretamente, o leitor a refletir sobre questões ambientais ao tratar de "*Impactos da geração distribuída em redes de distribuição*". Nesse trabalho Shayani e Oliveira seguem na linha que vem sendo ventilada unindo engenharia elétrica com sua resultante social, recomendando a avaliação de benefícios decorrentes da instalação de geração distribuída em redes de distribuição e ao mesmo tempo sugerindo pesquisas mais abrangentes para a verificação de seus impactos a montante e a jusante do sistema elétrico e suas decorrências.

Severino, Camargo e Oliveira discutem em seu artigo "*Geração distribuída: Discussão conceitual e nova definição*" o repensar dessa modalidade de distribuição. Isso porque "*os sistemas elétricos convencionais não conseguem garantir o suprimento sustentável de energia elétrica com a abrangência e a qualidade exigidas pela sociedade do século XXI*". Para tal, abrem a discussão sobre o assunto "reconhecendo essa necessidade". Voltando a tocar na questão da interdisciplinaridade, esses autores apresentam o que denominam de "propósitos": o primeiro, técnico de engenharia e o segundo, econômico. Ambos correlacionados na questão discutida.

Na continuação dos artigos, Zukowski Jr. em "*Geração de energia em comunidades isoladas: O caso da comunidade Boa Esperança*" reforça a necessidade de expansão e permanência – ainda que não os explicite diretamente – de programas de eletrificação rural ou, mais apropriadamente, de comunidades distanciadas desse recurso. Trata-se de um estudo de caso específico de uma comunidade encravada no Estado de Tocantins.

O sexto artigo nos leva a uma forma moderna de geração de energia com amplos reflexos na economia brasileira e mundial. Brasileira pelas "*Possibilidades tecnológicas de aproveitamento da biomassa para produção de biocombustíveis*" por ser um destaque nacional. Mundial por contribuir para a expansão desse combustível e pelos reflexos sobre o meio ambiente que não é local, mas sim universal. Há que destacar-se que o aproveitamento da biomassa é desencadeador de uma extensa cadeia produtiva, entre os quais se sobressaem a geração de energia elétrica e a produção de combustíveis líquidos, entre outros, como destacam seus autores.

Alves e Valdés Serra nos apresentam em "Bases tecnológicas da obtenção de biodiesel" "*a atual configuração da tecnologia de obtenção de biodiesel no mundo (...) fornecendo as bases para aplicações industriais*". Grosseiramente falando, seria uma forma de se verificar os efeitos reprodutivos desse atualíssimo insumo tantas suas possibilidades de aplicação. Mais uma vez, ainda que indiretamente, o impacto ambiental do uso de combustíveis é destacado pela contribuição minorizadora dessa produção.

O artigo de Kamimura e Burani em "*Sobre o consumo de lenha no setor residencial rural brasileiro*" tem por objetivo "*apresentar uma proposta metodológica para avaliação do consumo da lenha nos domicílios rurais*" tomando por base uma comparação com seu concorrente direto, o GLP - gás liquefeito de petróleo.

No "*Estudo sobre as vantagens e desvantagens do uso da gasolina, etanol e a mistura dos dois combustíveis em motores flex-fuel*", Lázari e Abreu visam analisar e avaliar veículos modernos – com esse tipo de motor – e "*as relações entre o consumo de etanol comparado com a gasolina, considerando fatores como rendimento, preço e sustentabilidade ambiental*". Vê-se nesse artigo o total domínio interdisciplinar pelas variáveis analisadas.

Para fechar a coletânea de artigos aqui exposto, o artigo de Severino e Oliveira sobre "*Fontes e tecnologias de geração distribuída para o atendimento a comunidades isoladas*" é um atestado dessa afirmação. Nele, os autores, reconhecem, discutem e apresentam "*tecnologias de geração elétrica para atendimento a essas comunidades*" envolvendo "*geração fotovoltaica e geração por meio de células a combustível, usuárias da radiação solar e do gás hidrogênio obtido por meio da hidrólise da água*"

Como conclusão deste prefácio, fica a certeza de que, mais que nunca, é necessário que cabeças se arejem para que se possa, conjuntamente, contribuir para com um planejamento sistêmico da energia no qual participem, de maneira ordenada, especialistas de uma multiplicidade de saberes com um único objetivo, a satisfação das necessidades sociais.

Prof. Dr. Sinclair Mallet Guy Guerra

CAPITULO I

TECNOLOGIA APROPRIADA:
INSTRUMENTO DE DESENVOLVIMENTO DA AGRICULTURA FAMILIAR E DE COMUNIDADES RURAIS

TECNOLOGIA APROPRIADA: INSTRUMENTO DE DESENVOLVIMENTO DA AGRICULTURA FAMILIAR E DE COMUNIDADES RURAIS.

Evandro Reina[1]
Fábio Josias Farias Monteiro[1]
Thiago Magalhães de Lázari[1]
Yolanda Vieira de Abreu[2]

RESUMO

Tecnologia apropriada caracteriza-se pelo uso de técnicas acessíveis à agricultura familiar. Sua transferência é realizada utilizando insumos, matérias primas e mão-de-obra local, respeitando o tamanho da terra, a cultura e o conhecimento intrínseco do agricultor. A construção de instrumentos, equipamentos, maquinários e outros produtos são de baixo custo e direcionados para solução de problemas dos agricultores familiares. Como resultado, além do aumento da produtividade das lavouras, formação de excedente e incremento da renda, tem-se a conversão da situação de subsistência do agricultor familiar, para uma condição de sustentabilidade. Este estudo tem como objetivo apresentar a tecnologia apropriada e sua importância para o crescimento e desenvolvimento da agricultura familiar e das pequenas comunidades rurais. Será apresentado um estudo de caso do Projeto Quintal Verde utilizando-se o Sistema Mandala, e uma análise sobre a viabilidade de implantação de biodigestores para geração de energia alternativa e produção de adubo orgânico.

Palavras-chave: Tecnologia Apropriada; Agricultura Familiar; Sustentabilidade.

1.1 INTRODUÇÃO

Os mecanismos de implantação de tecnologias modernas, principalmente em relação à aplicabilidade em condições diversas, sem levar em consideração o clima, cultura e a necessidade das comunidades nas quais estavam sendo aplicadas, são na maioria das vezes políticas de concentração da propriedade da terra, de renda e de produtos destinados a exportação. A utilização contínua e crescente de um paradigma agrícola que é dependente de tecnologia moderna, energia, grande extensão de terras e água, que são bens escassos, não apenas tendem a elevar os custos de produção dos alimentos, como também propicia a

[1] Mestrandos em Agroenergia. Universidade Federal do Tocantins (UFT)
[2] Professorado Mestrado em Agroenergia. Universidade Federal do Tocantins (UFT)

formação de latifúndios, desmatamento e o aumento de conflitos no campo (RIGBY & BROWN, 2007).

No Brasil, o processo de modernização tecnológica da agricultura, principalmente nas décadas de 1960 e 1970 que participaram da Revolução Verde da época, não teve resultados diferentes dos outros países que se submeteram ao mesmo processo. Tal "revolução" promoveu juntamente com o aumento da produção agrícola para exportação, um modelo de política excludente, altamente poluente e concentradora (PASSINI, 1999).

A abordagem da pesquisa realizada foi do tipo exploratório, descritivo, bibliográfico e estudo de caso. Os dados primários quanto ao estudo de caso, foram obtidos através da participação direta dos autores do artigo nas fases de implantação e condução de algumas etapas do Projeto Quintal Verde. Para o estudo da viabilidade de implantação de biodigestores foram utilizados dados secundários sistematizados através de consulta a livros, internet e órgãos governamentais, objetivando definir conceitos e organizar informações que possibilitem a elaboração de uma proposta simples, econômica, viável e que leve em consideração as características da agricultura familiar. Para coletar os dados para o desenvolvimento dos estudos propostos foram realizadas entrevistas com técnicos do Instituto de Desenvolvimento Rural do Estado do Tocantins (RURALTINS) e consultados endereços eletrônicos da Secretaria de Agricultura do Estado do Tocantins (SEAGRO), Secretaria de Planejamento (SEPLAN) entre outros. Posteriormente, os dados obtidos foram analisados e sistematizados de forma a fundamentar os resultados obtidos e transferir de modo fiel a experiência do estudo de caso e a viabilidade da implantação de biodigestores, com a finalidade de que o leitor possa reproduzí-los, caso necessário.

Este estudo apresenta a implantação de tecnologias apropriadas como solução para os problemas dos agricultores familiares ou comunidades. Para tanto, foi detalhado o estudo de caso do projeto Quintal Verde utilizando Sistema Mandala implantado na comunidade Quilombola Lagoa da Pedra, localizada no município de Arraias (TO) e um estudo, simulado, sobre a viabilidade de implantação de biodigestores para geração de energia alternativa e produção de biofertilizante para a agricultura familiar e pequenas comunidades rurais. Estes modelos tecnológicos são desenvolvidos de acordo com o tamanho da propriedade e condição social do agricultor familiar. Justifica-se este trabalho, porque 84,4% dos empreendimentos

agrícolas no Brasil são classificados como familiar e empregam 74,4% da população rural (MDA, 2005).

1.2 TECNOLOGIA APROPRIADA: DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS

A palavra "tecnologia" vem do grego (*techné* e *logo*s) que significa o conjunto dos conhecimentos sobre os processos e meios de transformação dos objetos de trabalho, e vem sendo utilizada desde 1615 no idioma inglês, tendo o significado de discurso ou tratado sobre as artes (GAMA, 1986). A origem da idéia de tecnologia apropriada remonta o início do século XX, quando Gandhi desenvolve uma abordagem para manutenção e disseminação das tecnologias tradicionais nas vilas indianas. Ele incentivou a produção de alimentos e fertilizantes naturais para atendimento das necessidades dos habitantes dessas vilas por meio de cooperativas familiares e com tecnologias tradicionais condizentes com as condições financeiras, culturais e demográficas da Índia. Defendia, essencialmente, que a tecnologia deveria ser desenvolvida a partir de uma abordagem integrada de desenvolvimento socioeconômico e cultural para atender demandas locais. Esta abordagem foi esquecida até a década de 1960, quando ocorre sua re-emergência por meio do conceito de tecnologia apropriada (HERRERA, 1981). Em 1961, Ernest F. Schumacher, economista, introduz o termo "tecnologia apropriada" exatamente a partir de sua identificação com as obras de Gandhi na Índia. Mais tarde em seu livro "*Small is Beautiful*", enfatiza quatro critérios para esta tecnologia: pequeno, simples, barato e pacífico (SCHUMACHER, 1973).

Segundo Abiko (2003), para definir tecnologia e seu campo de atuação, deve-se esclarecer inicialmente que tecnologia não deve ser confundida com técnica. Estes dois termos possuem conceitos bastante diferenciados. A técnica, ao contrário da tecnologia, é tão antiga quanto o homem. O homem ao produzir fogo ou construir ferramentas e armas, estava utilizando-se de uma técnica, o que permitiu que sobrevivesse e pudesse se impor sobre os animais (VARGAS, 1994). Já a tecnologia, foi definida por Vargas (1994), como a solução de problemas técnicos por meio de teorias, métodos e processos científicos, pode se traduzir como juntar o "fazer com as mãos" e o "desenvolver e criar com a mente" de forma formal e subjetiva. A tecnologia transforma o conhecimento tácito, sendo aquele que o indivíduo adquiriu ao longo da vida, que está na cabeça das pessoas, que é informal e que se passa de geração em geração de forma oral, em conhecimento formal, escrito, estudado, analisado e

que pode se adaptar e desenvolver a fim de melhorar nosso conhecimento da realidade ou facilitar a vida do ser humano na Terra.

O termo tecnologia apropriada, segundo Goldemberg (1978) pode ser definido como sendo um processo de estabelecimento dos efeitos sociais e ambientais de uma tecnologia proposta antes que ela seja desenvolvida, e a tentativa de incorporar elementos benéficos, nas várias fases de seu desenvolvimento e utilização. A tecnologia é o conjunto dos conhecimentos de que uma sociedade dispõe sobre ciências e artes industriais, incluindo os fenômenos sociais e físicos, e a aplicação destes princípios à produção de bens e produtos. Ainda segundo o mesmo autor uma tecnologia para ser considerada apropriada deve apresentar os seguintes aspectos sociais e econômicos:

1. Satisfazer as necessidades das camadas mais pobres da população;
2. Preservar o meio ambiente;
3. Ser adequada em relação aos recursos naturais disponíveis;
4. Depender de fontes de energia disponíveis no local de sua aplicação.

Dentre estes critérios, o mais adequado no contexto da tecnologia apropriada é o de satisfazer as necessidades das camadas mais pobres. Portanto, esse tipo de tecnologia para ser aplicada deve ser simples, de pequena escala, de baixo custo e intensivo uso no trabalho. Os principais benefícios podem ser observados em pequenas comunidades rurais, permitindo a substituição de técnicas antigas e obsoletas, sem que haja danos no processo produtivo. Assim, o produtor continua explorando ao máximo todo o potencial dos recursos locais em matérias primas, energia e equipamentos sem nenhum prejuízo à produção.

É importante considerar que quase metade dos estabelecimentos brasileiros do tipo familiar (49,8%) depende exclusivamente da força física dos seus integrantes para realizar as tarefas agrícolas necessárias à produção, como arar, semear, capinar e colher (GUANZIROLI *et. al*., 2001). A introdução de tecnologias apropriadas no meio rural torna o trabalho mais leve e produtivo, promovendo desenvolvimento e inclusão social neste setor.

Para muitos, tecnologia apropriada é sinônimo de tecnologia atrasada, superada pelos avanços sistematicamente proporcionados pela incorporação de novos conhecimentos gerados pelas atividades de P&D (RODRIGUES & BARBIERI, 2008). Entretanto, para agricultores que

dispõem de pouca infraestrutura tecnológica em seu sistema produtivo, a inserção desta tecnologia, mesmo com toda sua simplicidade, pode sim incrementar características agronômicas nos sistemas produtivos promovendo o desenvolvimento econômico e social. Esta tecnologia é adaptada ao local e às necessidades do usuário e, por isso, diferentes grupos culturais e geográficos poderão obter resultados diferenciados conforme sua aplicação. Assim, cada produtor irá adotar o mecanismo que melhor atender sua demanda imediata, lançando mão de toda base tecnológica possível à sua condição espacial, social e financeira.

Assim ocorre no Estado do Tocantins, onde grande parte da agricultura familiar é caracterizada como de subsistência, cujos ocupantes são populações tradicionais como quilombolas, indígenas e ribeirinhos. A transferência da tecnologia apropriada permite que estas comunidades cresçam, produzam excedentes e se desenvolvam de forma sustentável.

Um dos entraves para à difusão de modelos de tecnologia apropriada é a multiplicidade de tipos de agricultores familiares e a insuficiência de pesquisas e desenvolvimento. Falta treinamento nas diversas instituições, tanto governamentais, quanto privadas, direcionadas a criar soluções para resolver problemas dos agricultores familiares através do desenvolvimento de projetos de tecnologias aplicáveis à realidade dos mesmos.

1.3 ESTADO DO TOCANTINS

No Estado do Tocantins existem aproximadamente 34.521 estabelecimentos familiares. No total são 136.785 pessoas ocupadas dentro do processo de produção da agricultura familiar, representando 13% do total da população do Estado. Anualmente, contribuem e geram uma renda em torno de R$ 108 milhões de reais à economia do Estado (SANTOS, 2004). Dos 34.521 estabelecimentos familiares do estado, 10.939 (32%) são classificados como quase sem renda, 8.484 (25%) são considerados de baixa renda, 11.139 (32%) são de renda média e 3.959 (11%) são classificados como de rendas altas. As principais atividades agropecuárias desenvolvidas pelos agricultores familiares são a criação extensiva de gado bovino e os cultivos de arroz, mandioca, milho e fruticultura (CONAB, 2008).

Desta forma, o Estado deve contribuir para o melhoramento de técnicas e consequentemente o desenvolvimento destes agricultores. A tecnologia apropriada é simples, mas dentro do

cenário dos pequenos produtores agrícolas tocantinenses faz diferença e proporciona melhoria de qualidade de vida e aumento da produtividade das hortas e lavouras. Tal situação ocorre porque esta tecnologia permite que o produtor explore seu próprio potencial, da sua terra e suas lavouras utilizando equipamentos e soluções de baixo custo, porém eficientes e adequados ao meio ambiente.

É considerável a representação da agricultura familiar no Estado do Tocantins, por isso a importância em auxiliar o crescimento e o desenvolvimento das famílias por meio da transferência de tecnologias apropriadas. Para que isso ocorra, é importante o apoio intensivo dos órgãos governamentais responsáveis pelas políticas públicas ambientais e sociais, como é o caso principalmente da Secretaria de Agricultura do Estado do Tocantins – SEAGRO/TO e o Instituto de Desenvolvimento Rural do Estado do Tocantins – RURALTINS, ambos responsáveis pela manutenção da agricultura familiar no Estado. Para isso, a SEAGRO e o RURALTINS têm executado algumas ações voltadas para a agricultura familiar, com o objetivo de efetivar o desenvolvimento sustentável destas famílias através da elevação do poder de renda. Através desses processos, muitos são os exemplos de tecnologias apropriadas que atualmente são dominadas por pequenos agricultores tocantinenses e que já apresentam resultados positivos significativos. Entre elas a utilização de tração animal reduzindo a necessidade da compra de combustíveis, geradores de energia para as comunidades que não têm acesso às redes de transmissão, projetos de produção de hortaliças e frutas em espaços reduzidos, sistemas agroflorestais como forma de diversificação das atividades agrícolas, entre várias outras que beneficiam as famílias no campo.

1.4 EXPERIÊNCIAS COM TECNOLOGIAS APROPRIADAS NO ESTADO DO TOCANTINS

1.4.1 Projeto Quintal Verde

O projeto Quintal Verde utilizando o Sistema Mandala e outras formas de tecnologias apropriadas ao cultivo de hortaliças, e estão sendo implantados na comunidade Quilombola Lagoa da Pedra, localizadas no município de Arraias – TO.

O Sistema Mandala é um dos principais modelos de utilização de tecnologias apropriadas por agricultores familiares no âmbito do estado do Tocantins. A proposta para implantação do

projeto partiu de uma ação do governo do Estado através do Instituto de Desenvolvimento Rural do Estado do Tocantins - RURALTINS, na busca pelo incentivo à produção de frutas e hortaliças, envolvendo comunidades, agricultores familiares e escolas, visando, entre outros benefícios, a segurança alimentar dos atores envolvidos.

Este projeto transmite modelos de tecnologia apropriada que sejam aplicáveis à realidade de pequenas comunidades rurais, buscando incrementar a produção de verduras, legumes, cereais, frutas, raízes entre outros cultivos, através da construção de hortas comunitárias em qualquer local onde seja apropriada sua implantação como: estabelecimentos particulares, escolas estaduais, municipais, creches entre outras, sempre visando atender o número máximo de pessoas. Para a elaboração deste estudo de caso foram utilizados dados primários coletados por estes autores artigo, que participaram individualmente de algumas fases de implantação e condução do Projeto Quintal Verde. Essa participação possibilitou sistematizar informações e fatos provenientes das experiências obtidas em campo.

Para que o projeto se consolidasse, foram realizadas palestras, dias em campo, visitas técnicas e eventos com o objetivo de transmitir informações e os benefícios advindos da sua utilização. Existe por parte do Governo do Estado o objetivo de incentivar o cultivo de frutas e hortaliças.

A implantação e condução deste projeto junto à comunidade foram realizadas utilizando modelos de tecnologias apropriadas à realidade local, considerando as características agronômicas assim como as condições financeiras e culturais dos beneficiários. Toda a montagem do projeto, desde sua implantação, escolha dos produtos, manuseio e condução das hortas, foi construído junto com a comunidade, utilizando somente insumos e matérias primas locais, bem como na produção dos biofertilizantes e inseticidas naturais, até a colheita e armazenamento dos produtos. A comunidade local também participa de forma conjunta e efetiva na parte de transportes, mão de obra e outras atividades necessárias para a efetivação do projeto.

Os resultados obtidos não se restringiram somente a segurança alimentar dos agricultores e suas famílias, mas de toda população em geral. Ao longo do projeto observou-se que houve

incremento na renda dos produtores rurais, chegando a um ganho diário de R$ 6,00 somente com a comercialização do excedente produzido nos quintais.

As hortas comunitárias e as mandalas são implantadas sob orientação de um agrônomo ou técnico agrícola, sendo que a escolha das hortaliças é feita de forma diversificada, garantindo uma grande variedade de produtos o que permite atender um número elevado de consumidores.

1.4.2 Funcionamento do Sistema Mandala

O Sistema Mandala consiste no consórcio de produção agrícola e é bastante difundido em pequenas comunidades rurais. O objetivo principal do sistema é diversificar as atividades agrícolas com a finalidade de melhorar o padrão alimentar das famílias e aumentar a renda através da introdução de tecnologia apropriada de baixo custo de produção. Desenvolvido para viabilizar a produção de alimentos de maneira sustentável em regiões semi-áridas, o Sistema Mandala não só vem cumprindo o propósito de garantir o sustento das famílias dos pequenos produtores, como ganha adeptos em várias regiões do país.

A Mandala é representada por um desenho composto por figuras geométricas concêntricas (Fig. 01). O sistema Mandala reproduz a estrutura do Sistema Solar.

Figura 01: Estrutura do Sistema Mandala.
Fonte: SEBRAE/MS, 2004

No centro do sistema existe um reservatório de água com dimensionamento circular e em forma de funil. Este reservatório, além do fornecimento de água, serve para a criação de

peixes, patos e marrecos, que enriquecem organicamente a água do reservatório. Já os círculos internos do sistema são assim definidos e utilizados (Fig. 02):

- Os três primeiros círculos são denominados "Círculo de Melhoria da Qualidade de Vida Ambiental", e destina-se ao cultivo de hortaliças e plantas medicinais, atendendo às necessidades de subsistência da família.
- Os cinco anéis seguintes formam os "Círculos da Produtividade Econômica", e se destinam a culturas complementares diversas, como milho, feijão verde, abóbora e frutíferas, cuja produção em maior escala permite criar excedente para comercialização, gerando renda para o agricultor.
- O último anel da Mandala é denominado "Círculo do Equilíbrio Ambiental" e destina-se à proteção do sistema, com cercas vivas e quebra-ventos, como forma de melhorar a produtividade e prover parte da alimentação animal, além da oferta dos nutrientes necessários à recuperação do solo.

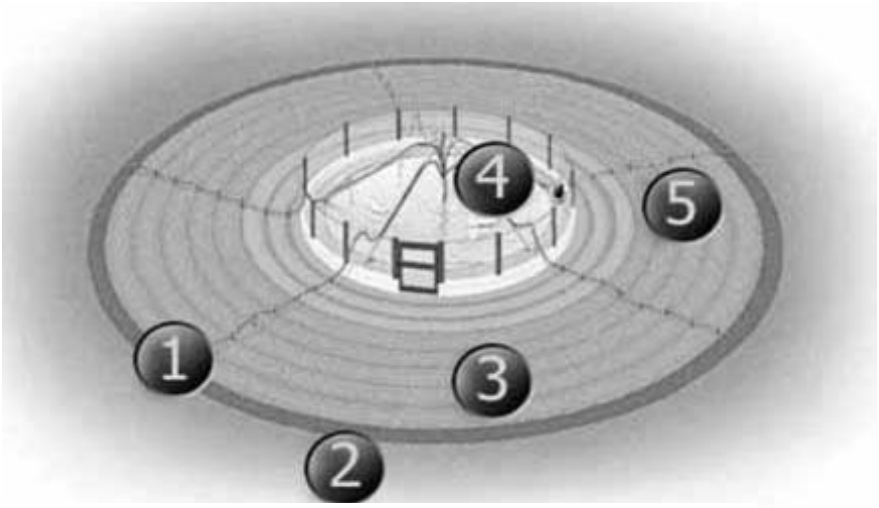


Figura 02: Esquema de Distribuição do Sistema Mandala

1. Sistema de Irrigação partindo do Reservatório no Centro do Sistema;
2. Círculo de Equilíbrio Ambiental (Proteção do Sistema);
3. Círculos da Produtividade Econômica (Excedente para Comercialização);
4. Tanque d'Água (Centro do Sistema);
5. Círculo de Melhoria da Qualidade de Vida Ambiental (Subsistência da Família).

O projeto Quintal Verde foi implantado há três anos na comunidade Quilombola Lagoa da Pedra, localizada no município de Arraias - TO, região Sudeste do Estado, distanciada 342 km de Palmas, capital do Estado.

A horta comunitária mobiliza 10 das 38 famílias existentes na comunidade, as quais produzem peixes, plantas medicinais, olerícolas, milho, arroz, feijão e três cultivares de banana, tudo no sistema orgânico. A implantação deste projeto na comunidade surgiu após os extencionistas dessa região verificarem a deficiência de hortaliças e legumes no hábito alimentar da população, em conseqüência da distância da cidade e a dificuldade de compra além da falta de costume em produzir e consumir tais produtos.

O sistema mandala implantado possui área de 2000 m². No centro existe um reservatório circular com raio de 10 metros e 0,8 metros de profundidade com fundo de cimento. Neste reservatório é armazenada água da chuva e é feita a criação de 250 caranhas (*Lutjanus cyanopterus)* peixe muito apreciado na região. No centro do reservatório foi colocada uma lâmpada que funciona como armadilha luminosa e tem como objetivo atrair insetos e larvas que acabam caindo no reservatório servindo de alimento para os peixes, exercendo automaticamente o controle natural dos insetos. A água do reservatório alimenta o sistema de irrigação através de uma bomba submersa (1900 L/h) instalada em um tripé de madeira sobre o reservatório. Nos círculos da mandala são produzidos vários tipos de verduras, legumes, bulbos, raízes, tubérculos entre outros, que servem a subsistência da comunidade e gera excedentes que são comercializados juntamente com os demais produtos oriundos das propriedades rurais.

A outra fase do Quintal Verde consiste na construção de hortas compostas por canteiros, nas quais são utilizadas diferentes formas de tecnologias apropriadas que vêm integrar o sistema de produção proposto pelo projeto. A seguir, como realizado para o Sistema Mandala, serão detalhados os mecanismos de implantação de hortas do Quintal Verde.

1.4.3 Implantação das Hortas

Vários fatores são considerados no processo de implantação de uma horta. Todos eles devem ser trabalhados de forma conjunta, visando proporcionar condições ótimas para o desenvolvimento das culturas e consequentemente incremento na produtividade.

O primeiro passo é a escolha da cultura a ser trabalhada e a observação das condições de solo, clima, água entre outras que a cultura demande. A escolha de um local apropriado para o cultivo é muito importante. O local deve ser plano, com boa drenagem e luminosidade, se localizar longe de fossas sépticas, além de possuir disponibilidade contínua de água para

irrigação. Para melhor condicionamento das culturas trabalhadas, na construção dos canteiros é recomendada à utilização de solos de textura areno-argilosa, ou franca arenosa.

Definido o local e as culturas a serem cultivadas, realizou-se a limpeza da área utilizando enxadas e, para o transporte do material utilizou-se carrinho de mão. Em seguida, com o auxílio do ancinho foram desagregados os torrões e utilizando estacas e linha realizou-se a demarcação dos canteiros, preparando-os nas dimensões recomendadas de 2 a 5 metros de comprimento, 1,20 metros de largura e altura mínima de 15 centímetros. O espaçamento recomendado a ser utilizado entre canteiros é de 0,50 metros, devendo ser construídos sempre no sentido Leste-Oeste para melhor aproveitamento da luminosidade. Com os canteiros demarcados o próximo passo foi o revolvimento do solo com a utilização de enxadão e enxada. Em seguida espalhou-se um carrinho de mão de esterco (podendo utilizar composto orgânico) em cada m² de canteiro. O solo foi misturado a este material iniciando o levantamento do canteiro onde são cultivadas verduras (alface, couve, taioba, brócolis, repolho, espinafre entre outros); raízes, bulbos e tubérculos (batata, cebola, beterraba, cenoura, batata-doce, inhame entre outras); legumes (tomate, abóbora, abobrinha, pimentão, quiabo, jiló entre outras); condimentos (cebolinha, salsinha, pimenta, gengibre, alho entre outras).

Os espaçamentos entre plantas e entre linhas (Fig. 03) variam de acordo com as hortaliças cultivadas.

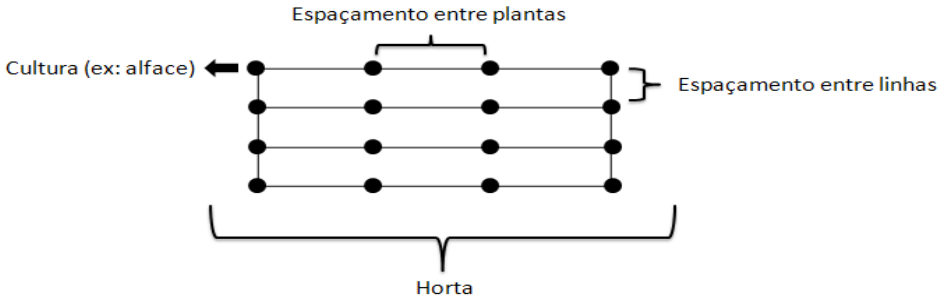


Figura 3: Esquema demonstrativo dos espaçamentos entre planta e linha.
Fonte: Elaboração própria

Culturas como tomate, pimentão, couve, jiló, berinjela, abóbora e pepinos são cultivados em covas, que devem ser abertas com antecedência mínima de 18 dias do plantio ou transplante, nas dimensões de 0,2 x 0,2 ou 0,3 x 0,3 metros de largura e 0,2 a 0,3 m de profundidade. O espaçamento entre covas varia de acordo com a hortaliça a ser plantada, como mostrado na tabela 01.

Tabela 01: Época de Plantio, Ciclo e Espaçamento de Culturas utilizadas em Hortas

CULTURA	EPOCA DE PLANTIO	CICLO	ESPAÇAMENTO (cm)
Abóbora	Julho a novembro	5 a 6 meses	200 x 200
Acelga	Abril a agosto	60 a 70 dias	40 x 40
Beterraba	Maio a setembro	75 a 90 dias	30 x 30
Cenoura	Maio a julho	80 a 90 dias	20 x 10
Feijão	Agosto a maio	40 a 60 dias	40 x 15
Nabo	Março a agosto	2 a 3 meses	20 x 20
Pepino	Agosto a outubro	2 a 3 meses	150 x 80
Quiabo	Setembro a dezembro	60 a 80 dias	100 x 50
Rabanete	Todo o ano	30 dias	20 x 5
Salsa	Todo o ano	40 a 50 dias	20 x 5
Alface	Todo o ano	60 a 80 dias	30 x 30
Berinjela	Setembro a dezembro	120 a 130 dias	50 x 60
Cebola	Março a junho	170 a 180 dias	15 x 20
Chicória	Abril a setembro	3 meses	30 x 30
Couve comum	Março a julho	3 meses	50 x 50
Pimentão	Agosto a outubro	130 a 150 dias	60 x 60
Tomate	Agosto a dezembro	4 meses	80 x 50
Couve-flor	Fevereiro a março	4 a 5 meses	60 x 60
Repolho	Março a julho	4 meses	60 x 60

Fonte: Ruraltins, 2008.

Dependendo da cultura trabalhada, a semeadura foi realizada diretamente no canteiro ou inicialmente em bandejas de células de isopor, sendo posteriormente transplantadas. No caso da utilização de bandejas, foram preenchidas com terra e esterco na proporção de 1/4 de esterco e 3/4 de terra. A semeadura nas bandejas foi realizada manualmente com 15 a 20 dias de antecedência as datas de plantio. Após a semeadura, as bandejas foram acondicionadas em área coberta por sombrite (50% de sombreamento), e irrigadas constantemente de forma a mantê-las sempre úmidas, até que a cultura atinja o tamanho ideal para ser transplantada no canteiro. A estrutura, isto é, a área com sombrite em que as bandejas foram dispostas, é construída utilizando-se madeira morta adquirida no próprio imóvel. As dimensões ideais da

instalação são de 2 metros de largura x 3 metros de comprimento x 2 metros de altura (Fig. 04).

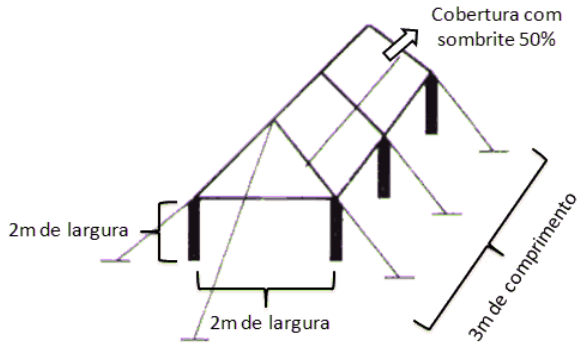


Figura 04: Dimensões da Estrutura para Acondicionamento das Bandejas.
Fonte: Elaboração Própria

A irrigação das mudas nas bandejas foi feita utilizando regadores. Para a irrigação dos canteiros utilizou-se uma tecnologia apropriada na qual se substitui os microaspersores por hastes de cotonetes presos a mangueira de polietileno. Os materiais necessários à implantação do sistema são: mangueira polietileno ¾"; registro ¾"; joelho ¾"; caixa de cotonetes (150 unidades); Te ¾"; cola; redutor de 1" para ¾"; cano ¾" e braçadeira ¾" (RURALTINS, 2010). A quantidade de material a ser adquirido vai depender do tamanho do projeto. As mangueiras funcionam como linhas principais e de derivação permitindo que todos os canteiros e covas sejam alcançados, enquanto a haste de cotonete funciona como microaspersor.

As mangueiras foram perfuradas utilizando prego aquecido, sendo que no local da perfuração é fixada uma haste do cotonete. A outra extremidade da haste foi vedada utilizando fogo, e logo abaixo da vedação realizou-se um pequeno corte transversal de onde sai o jato d'água, assim, o cotonete se transforma num microaspersor (Fig. 05).

Figura 05: Esquema de microaspersão utilizando tubo plástico e cotonete.
Fonte: *Apud* do site Gaia Terra Nova, 2007

Este jato d'água chega a alcançar 1 metro de distância, aumentando a eficiência na utilização da água. Após montado o sistema, basta girar a haste para a direção que se deseja irrigar. Com esse sistema utilizou-se uma linha de irrigação por canteiro (pode ser utilizado também entre covas). Esta tecnologia substitui perfeitamente os microaspersores convencionais, e muitas são as vantagens de sua utilização.

Além do baixo custo de implantação, 85% inferior a outros materiais utilizados em irrigação de hortas, este mecanismo permite a otimização no uso da água, considerando que a altura em que a haste se encontra do solo é pequena reduzindo a perda por deriva, pode funcionar 24 horas por dia, exige pouca mão de obra e facilidade de automação por estar ligada a uma torneira comum abastecida por água proveniente da caixa d'água.

Outra forma de tecnologia apropriada utilizada no sistema foram os biofertilizantes, que possuem compostos bioativos, resultantes da biodigestão de compostos orgânicos de origem animal e vegetal. Para sua produção foram utilizados somente insumos disponíveis na propriedade. Esta tecnologia consiste em preparar um produto totalmente natural cujas características nutricionais são parecidas à dos fertilizantes sintéticos. Este produto fornece macro e micro nutrientes essenciais ao desenvolvimento das culturas, aumentando consideravelmente a produtividade. O biofertilizante foi preparado em um tambor de 200 litros, na qual a proporção utilizada foi de 1/4 de esterco bovino e 3/4 de água (Fig. 06).

Figura 06: Recipiente com as Proporções de Água e Esterco
Fonte: *Apud* do site Mão na Terra, 2007

Através da fermentação anaeróbica, os nutrientes, hormônios vegetais e substâncias com ação fungistática contidos no esterco são disponibilizados na água. Após a mistura dos insumos, o biofertilizante está pronto para uso dentro de aproximadamente 15 dias. O produto foi utilizado na irrigação dos canteiros (procedimento conhecido como fertirrigação) uma vez por semana, na diluição de 1 parte do biofertilizante e 9 partes de água. A utilização do

biofertilizante confere à cultura resistência ao estresse hídrico além de conter ação repelente a pragas, sendo eficaz no manejo de doenças. Outra opção de produto natural utilizado nos canteiros é a diluição de urina de vaca em água na proporção 1:20. Este produto também possui em sua composição alguns nutrientes e promove ação repelente a insetos assim como o biofertilizante.

Para substituir os adubos químicos, usualmente utilizados em grandes hortas, os produtores são orientados a produzir composto orgânico, através do processo conhecido como compostagem.

Este é um processo biológico de transformação de resíduos orgânicos sólidos em matéria orgânica homogênea e estabilizada, de cor escura e rica em partículas coloidais. Vários são os materiais que podem ser utilizados para o preparo do composto, desde restos de limpeza de açudes, folhas e galhos de árvores, palhas e capim, esterco de gado e frango até restos de cozinha (sobras de comida) (Fig. 07).

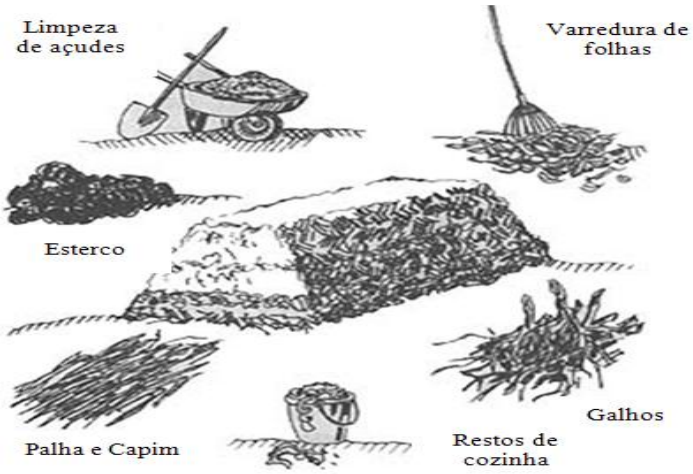


Figura 07: Estrutura da Pilha e Materiais a Serem Utilizados na Produção do Composto.
Fonte: *Apud* do site Sítio das Cachoeiras, 2010.

Não é recomendada a utilização de carne na produção do composto devido ao forte odor liberado no processo de decomposição. Os produtos orgânicos utilizados foram misturados com esterco de gado e montado a composteira (Fig. 08).

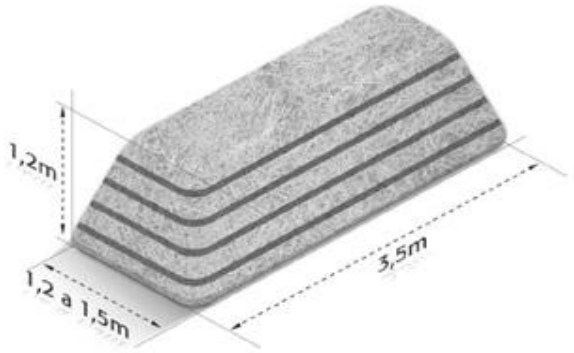


Figura 08: Estrutura de uma Composteira
Fonte: Revista Globo Rural, 2010

Cada leira foi construída em formato piramidal (pode ser trapezoidal), com uma base de 1,20 metros a 1,50 metros. A altura utilizada foi de 1,2 metros (pode variar entre um metro e 1,20 metros). É importante não diminuir este tamanho para não prejudicar a temperatura e a umidade do composto, uma vez que uma leira baixa perde calor.

O comprimento da composteira irá depender da quantidade de material na propriedade. Para calcular o comprimento de cada leira é preciso saber que o material orgânico, em geral, tem densidade baixa, de aproximadamente meio quilo por litro. Portanto, se o produtor tiver 100 quilos de material orgânico por dia, ele terá 200 litros de adubo. Uma leira de 1,5 metros de base, altura de 1,2 metros e produção mensal de 6 m^3 de resíduo terá um comprimento de 3,5 metros aproximadamente. Este foi o procedimento realizado neste trabalho.

O material composto foi umedecido com freqüência, mas em pouca quantidade (de modo que ao ser apertado com as mãos não escorra água). A temperatura interna foi controlada para não ultrapassar os 60ºC, sendo monitorada e controlada com pequenas adições de água. Para o controle da temperatura foi utilizada uma barra de ferro introduzida no interior da pilha (esta barra, ao ser retirada deve estar quente de tal forma que o manuseador possa segurá-la sem queimar as mãos). Caso a temperatura esteja muito elevada, a pilha deve ser revolvida de forma a reduzir a temperatura. Após algumas semanas o material adquire uma coloração marrom escura, semelhante ao marrom café. Dá para perceber que o composto está pronto quando não sente "cheiro ruim" e sim um "cheiro de terra", além disso, a aparência é bem homogênea e a temperatura fica igual à do ambiente, geralmente demora entre 80 e 90 dias para o material estar pronto para utilização.

A matéria orgânica incorporada como composto traz inúmeras vantagens, principalmente para melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo e bromatológicas das hortaliças. A matéria orgânica quando aplicada já está em estágio avançado e desejável de decomposição, que é o húmus já plenamente ativo, o que a partir da matéria orgânica bruta necessitaríamos de um tempo muito grande no solo para acontecer. O composto estará asséptico e o húmus trará inóculos de microorganismos e animais inferiores, ativando a vida do solo. Assim, o composto trará para o solo direta e indiretamente fatores importantes de manutenção de produtividade, além de constituir de uma alternativa simples e de baixo custo.

Estas são as formas de tecnologias apropriadas utilizadas dentro do Projeto Quintal Verde e Sistema Mandala. A implantação de projetos que fazem uso de formas de tecnologias apropriadas para sua instalação e condução em pequenas comunidades agrícolas, constitui um fator promotor para o desenvolvimento sustentável das famílias. A utilização de tecnologias relativamente simples como às citadas acima, apropriadas para utilização nas irrigações, adubação de hortas, métodos de controle fitossanitários que permitem a utilização de produtos naturais oriundos da propriedade, permitem aos produtores eliminar a necessidade de produtos externos ao imóvel, incrementando sua economia. As práticas utilizadas neste trabalho são extremamente econômicas, de fácil preparo e aplicáveis à agricultura familiar não só no Estado do Tocantins, mas em todo o país. Além de ser ecologicamente corretas por utilizarem somente materiais naturais adquiridos na propriedade, podem ser utilizadas na produção orgânica de alimentos, agregando valor aos produtos possibilitando a expansão da comercialização.

1.4.4 Resultados do Projeto Quintal Verde

O projeto Quintal Verde associado ao Sistema Mandala e suas tecnologias apropriadas, beneficiou aproximadamente 11.000 famílias e 8.000 estudantes de escolas públicas estaduais e municipais através da implantação de hortas (RURALTINS, 2008). É importante considerar que grande parte do que se produz nas hortas é consumido nos próprios lares e nas escolas. As folhas, raízes, legumes são largamente utilizadas nas merendas escolares. O incremento na dieta, proporcionando alimentação adequada, é fundamental para o processo de aprendizagem e disposição para as tarefas do dia a dia. Os alunos criam o hábito de consumir alimentos saudáveis e estimulam os pais a consumirem em casa e o processo acaba atingindo toda a família.

Além do que, os agricultores, graças à utilização das tecnologias apropriadas anexas ao projeto, conseguem elevar substancialmente a produtividade de suas hortas. Este fato permite que o excedente da produção seja disponibilizado no comércio da cidade ou nas feiras livres, fundamental para o escoamento da produção e aumento da renda. O RURALTINS, através do Programa Federal de Aquisição de Alimentos (PAA) Compra Direta Local, compra à produção dos agricultores familiares, entrega nas instituições sociais cadastradas e estes alimentos são distribuídos para comunidades, famílias e escolas que se encontram em situações de insegurança alimentar. Desta forma, além dos produtos disponibilizados nas feiras, o agricultor tem a possibilidade de vender seus produtos diretamente para o Estado, o que fundamenta a necessidade da aplicação destas tecnologias que promovem a elevação da produção. O programa Compra Direta além de gerar renda para o trabalhador rural contribui promovendo o desenvolvimento local.

O sucesso da implantação do Quintal Verde e do Sistema Mandala estimulou a difusão de tecnologia para o desenvolvimento da produção vegetal no Estado (SEAGRO/TO, 2007). O RURALTINS prevê que durante o ano de 2010, aproximadamente 123.940 pessoas receberão sementes de hortaliças e verduras para cultivarem hortas nos quintais, nas escolas, em comunidades e/ou no campo. Para este projeto está previsto o recurso no valor de R$ 2.168.911,00. Ainda, dentre as atividades previstas pelo RURALTINS, está à realização de 20 feiras e encontros da agricultura familiar, que estimulam e orientam os agricultores a comercializarem seus produtos (RURALTINS, 2010).

1.5 BIODIGESTORES

A disponibilidade energética no meio rural, principalmente em pequenas comunidades, vem sendo debatida já por algum tempo, entretanto, na maioria das vezes não se estudam todas as possibilidades de oferta deste bem, levando em consideração as potencialidades locais e fontes de energia disponíveis. Segundo Quadros (2010), um grave problema enfrentado pelos agricultores familiares é a escassez de fontes energéticas para fins produtivos, principalmente cocção, resfriamento, aquecimento e iluminação. Na maioria das áreas rurais os combustíveis mais limpos para cocção (querosene, GLP e gás natural) são escassos ou inexistem, devido à falta de infraestrutura de distribuição e comercialização (SANGA, 2004). O conjunto destes

fatores, quando o objetivo é produção energética, força o agricultor a suprir sua necessidade utilizando um bem que ele possui de sobra em sua propriedade: a lenha. Esta matéria prima ainda é a principal fonte de calor utilizada nas cozinhas dos pequenos produtores, entretanto, além dos impactos ao meio ambiente, a queima de lenha para uso doméstico causa graves problemas de saúde principalmente em mulheres e crianças, que ficam expostas diariamente à fumaça.

Visando reverter este quadro, a busca por fontes renováveis e alternativas de energia é um fator importante, por possibilitar atender as demandas de famílias rurais. Nesse sentido, o desenvolvimento de alternativas tecnológicas apropriadas que permitem a utilização eficiente da biomassa, com vistas à geração de energia, é uma das possibilidades a ser considerada. Segundo Esperancini *et al*., (2007), existem hoje diversas alternativas tecnológicas de aproveitamento da biomassa para geração de energia, que propiciam o uso mais racional dos recursos disponíveis na propriedade e são tecnicamente viáveis para a agricultura familiar. Neste contexto, o biodigestor desperta grande interesse pela tecnologia de biodigestão anaeróbia de resíduos animais e vegetais. Tal tecnologia propicia solução adequada, tanto ambientalmente, quanto economicamente, da alocação dos resíduos e ao mesmo tempo diminuindo custos fixos de produção de bens oferecidos pelo agricultor.

Segundo Afonso (2006) o mesmo biodigestor que trata os dejetos animais pode ser ligado ao esgoto doméstico das residências funcionando como um sistema de tratamento de esgotos para pequenas comunidades urbanas.

Complementando os aspectos técnicos que utiliza o sistema de tratamento de biodigestores, vale citar que biodigestores são estruturas fechadas para onde são conduzidos, por tubulações, o esterco e a urina dos animais. Nesse local, o material entra em processo natural de fermentação, por meio de bactérias anaeróbicas (que se desenvolvem na ausência total de oxigênio), e, ao fim do processo, são produzidos gases, resíduos pastosos e efluentes líquidos, sendo que os três subprodutos têm valor econômico.

O gás (metano, diferente do GLP que é o butano) pode ser utilizado para os mesmos fins: a geração de energia, aquecimento de pocilgas e aviários no inverno e até em fogões domésticos. O material sólido vira adubo natural para as lavouras. Já os efluentes líquidos

alimentam algas em tanques que depois viram comida para peixes criados em açudes (ASSIS, 2004).

A energia gerada através do biogás é renovável e pode substituir completamente a lenha e o gás de cozinha na produção de produtos primários, a exemplo de farinha, rapadura, requeijão, doces, biscoitos e bolos, incentivando as agroindústrias familiares. Pode também ser utilizado como combustível para motor gerador de energia elétrica e implementos agrícolas. Segundo Afonso (2006), este gás também pode ser utilizado no aquecimento de instalações para animais sensíveis ao frio (frangos e leitões de até 15 dias de idade, por exemplo) ou no aquecimento de estufas de produção vegetal.

Além do biogás, outro produto importante gerado através da utilização de biodigestores é o biofertilizante, que é um fertilizante líquido orgânico que atua diretamente na nutrição das plantas através da melhoria das propriedades físico-química e microbiológica do solo.

A utilização de biodigestores como tecnologia apropriada em comunidades rurais, permite ao produtor criar sua própria fonte energética através de produtos disponíveis em sua propriedade, evitando a dependência de produtos externos e caros. Para tanto, é preciso considerar que o sucesso desta tecnologia já foi comprovado por vários agricultores que, através de investimentos mínimos, implantaram modelos de biodigestores adaptados às características da propriedade e hoje se beneficiam por possuir uma fonte energética contínua da qual o proprietário tem total controle sobre seu uso e dos produtos a serem utilizados de forma a obter o biogás e o biofertilizante.

1.5.1 Modelos e Funcionamento

Para a implantação de biodigestores, é importante considerar que existem diversos tipos ofertados no mercado, sendo necessário observar o modelo que mais se encaixa as características da propriedade.

Dentre os modelos de biodigestores disponíveis no mercado nacional, se destacam os modelos contínuos, sendo os mais conhecidos e comumente utilizados o Indiano e o Chinês (TURDERA & DANILO, 2006). A figura 09 representa tridimensionalmente os dois modelos.

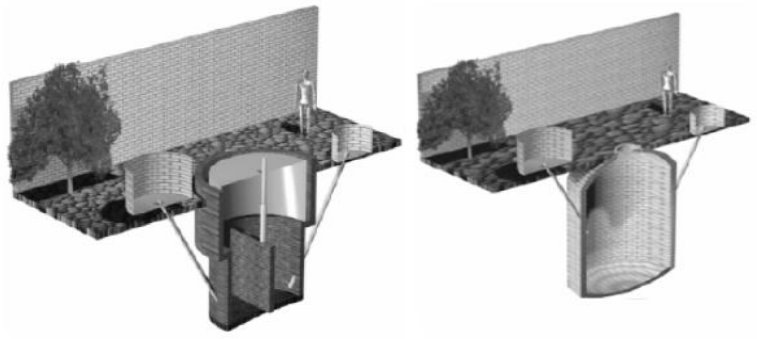


Figura 09: Representação tridimensional em corte dos biodigestores Indiano e Chinês.
Fonte: Turdera & Danilo, 2006

Pode-se observar na figura 09 que o biodigestor modelo Indiano possui uma campânula que funciona como gasômetro onde o gás é retido e depois distribuído. O modelo Chinês possui uma câmara cilíndrica para fermentação e o teto é em formato de abóbora onde o gás fica retido (TURDERA & DANILO, 2006). O modelo indiano pela simplicidade na implantação e condução tem sido mais utilizado no setor rural, entretanto, existem modelos mais simples de biodigestores que são implantados de acordo com as especificidades locais. Mesmo que haja variações nos modelos implantados quanto ao tipo e capacidade, todos os biodigestores seguem o mesmo ciclo de funcionamento conforme demonstrado na figura 10.

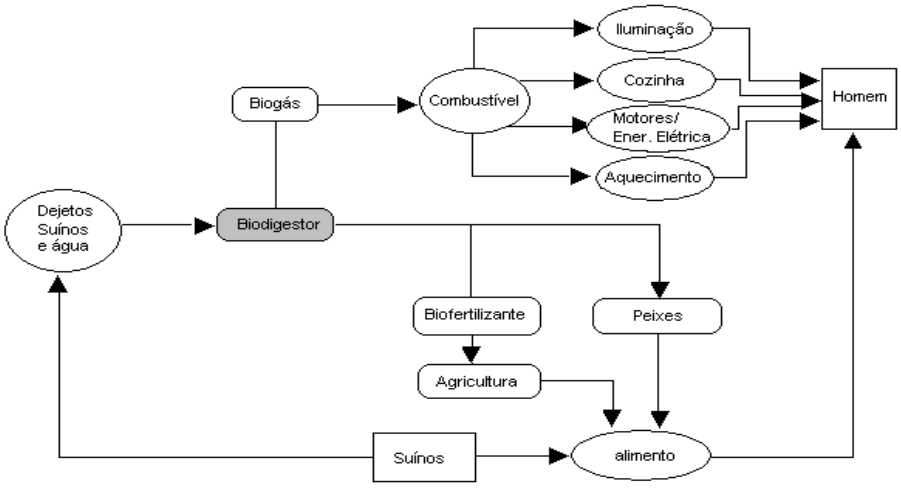


Figura 10: Ciclo de Funcionamento de um Biodigestor.
Fonte: Revista Produção Engenharia, 2005

Quanto ao biogás gerado no processo, é importante conhecer seu potencial relacionado ao poder calorífico, sendo o aspecto que confere ao produto características energéticas. Segundo Turdera & Danilo (2006), o poder calorífico do biogás produzido em biodigestor varia de 5.000 a 7.000 kcal/m^3, sendo variável devido à maior ou menor pureza, ou seja, da quantidade

de metano presente na mistura. Para efeito de comparação, a tabela 2 apresenta o equivalente energético médio de diversas fontes de energia em relação a 1 (um) metro cúbico de biogás.

Tabela 02: Comparação entre várias fontes de energia para gerar o equivalente a um metro cúbico de biogás.

FONTE CALORÍFICA	QUANTIDADE/UNIDADE
Álcool carburante	0,80 litros
Energia elétrica	4,69 kWh
Gasolina	0,61 litros
Gás de cozinha GLP	0,43 kg
Lenha	3,50 kg
Óleo Diesel	0,55 litros
Querosene	0,62 litros

Fonte: Colen, 2003

Para gerar o mesmo potencial energético de 1m³ de biogás o proprietário rural teria que utilizar mais de meio de litro de óleo diesel ou praticamente um litro de álcool carburante. Este fato, associado à facilidade de obtenção de matérias primas para produção do biogás e biofertilizante, consolida a eficácia desta tecnologia apropriada tendo em vista a dificuldade de acesso a estas fontes energéticas e ainda os preços elevados, muitas vezes inacessíveis aos agricultores.

As principais matérias primas utilizadas nos biodigestores são o esterco bovino, equino e suíno e a cama de frango. Segundo Trani (2008), a produção média diária de esterco desses animais é bem significativa. Uma vaca pesando 453 kg produz 23,5 kg de esterco por dia, um cavalo de 385 kg produz 16,3 kg, um porco de 72 kg produz 3,4 kg de esterco e um frango pesando 1,6 kg produz 100g de esterco + urina. Sendo assim, Nogueira (1986), apresenta o potencial de produção do biogás em função do tipo de esterco de alguns animais (tabela 3).

Tabela 03: Produção de Biogás em Função do Tipo de Esterco

MATERIAL	RENDIMENTO (m³ de biogás por kg de material orgânico)
Esterco fresco bovino	0,04
Esterco seco de galinha	0,43
Esterco seco de suíno	0,35

Fonte: Nogueira, 1986.

Através destes dados podemos supor uma situação hipotética para compreender o potencial de geração de biogás através de um biodigestor para uma família rural que possua: 05 vacas, 02 equinos, 04 Suínos, 15 frangos.

1. Biogás gerado através dos dejetos das vacas: considerando que cada vaca produz 23,5 kg de esterco/dia temos: 05 x 23,5 = 117,5 kg de esterco/dia. Cada kg produz 0,04 m³ logo temos: 117,5 x 0,04 = 4.7m³/biogás/dia.

2. Biogás gerado através dos dejetos dos equinos: Mesmo não constando na tabela, considera-se o mesmo rendimento do esterco fresco bovino. Considerando que cada equino produz 16,3 kg de esterco/dia temos: 02 x 16,3 = 32,6 kg de esterco/dia. Cada kg produz 0,04 m³ logo temos: 32.6 x 0,04 = 1.3 m³/biogás/dia.

3. Biogás gerado através dos dejetos dos suínos: considerando que cada suíno produz 3,4 kg de esterco/dia temos: 04 x 3,4 = 13.4 kg de esterco/dia. Cada kg produz 0,43 m³ logo temos: 13.4 x 0,35 = 4,69 m³/biogás/dia.

4. Biogás gerado através dos dejetos dos frangos: considerando que cada frango produz 0,1 kg de esterco + urina/dia temos: 15 x 0,1 = 1,5 kg de esterco/dia. Cada kg produz 0,43 m³ logo temos: 1,5 x 0,43 = 0,65 m³/biogás/dia.

Desta forma, a soma da quantidade de biogás produzido através do dejeto destes animais é da ordem de 11,34 m³/biogás/dia. Através da conversão destes valores para a aplicação direta do biogás na propriedade é possível demonstrar sua eficácia em números. Segundo Turdera & Danilo (2006), para satisfazer as necessidades de uma família de cinco pessoas em termos de uso caseiro, isto é, necessidade do produto para cozinhar, iluminação, manutenção de uma geladeira e banho aquecido, será necessário em termos de biogás (tabela 4):

Tabela 04: Biogás Necessário para Manutenção de Alguns Equipamentos.

EQUIPAMENTOS	BIOGÁS
Para a cozinha	2,10 m³
Para iluminação	0,63 m³
Para geladeira	2,20 m³
Para banho quente	4,00 m³
Total de biogás necessário	8,93 m³ (por dia)

Fonte: Turdera & Danilo, 2006

Considerando a situação hipotética realizada com uma propriedade rural que detém um quantitativo pequeno de animais, foi possível obter de 11,34 m³/biogás/dia, isto é, além de suprir toda a necessidade energética para os setores descritos acima, geraria um excedente de

2,41 m³/biogás/dia que poderia, por exemplo, ser utilizado para abastecimento de implementos utilizado no sistema produtivo.

Como subproduto do processo de geração de biogás tem-se o biofertilizante. Segundo Afonso (2006) o biofertilizante gerado no processo possui entre 90 a 95 % de água (isto é, 5 a 10% de fração seca do líquido). Nessa base seca, o teor de nitrogênio, dependendo do material que lhe deu origem, fica entre 1,5 a 4% de nitrogênio (N), 1 a 5% de fósforo (P) e 0,5 a 3% de potássio (K). Estes três macronutrientes são essenciais para o desenvolvimento de culturas agrícolas principalmente as hortículas, podendo ser empregados nas hortas comunitárias aumentando a produção agrícola garantindo mais renda ao produtor rural.

A utilização de biodigestores contribui para integração e sustentabilidade das atividades agropecuárias aproveitando o dejeto ao qual, normalmente, é dado pouco ou mesmo nenhum valor comercial, agregando valor aos produtos disponíveis no imóvel rural através da conversão em duas grandes fontes de desenvolvimento: energia e adubo.

1.5.2 Construção e Manutenção do Biodigestor

O custo de construção de um biodigestor é relativamente baixo, podendo oscilar de acordo com a região, tamanho e capacidade de geração. Na tabela 05 estão relacionados os materiais necessários para a construção de um biodigestor de 1,9 metros de profundidade por 1,5 metros de largura e 03 metros de comprimento. O tempo de construção considerando estas proporções é de aproximadamente uma semana.

Tabela 05: Materiais Básicos para Construção de um Biodigestor.

QUANTIDADE	DESCRIÇÃO
02 m³	Areia
01 m³	Brita média
5,5 metros	Plástico flexível com pelo menos 2,8 metros de largura
04 unid.	Tubo PVC de 03 polegadas
09 unid.	Sacos de 50kg de cimento
60 unid.	Blocos de cimento (12cmX20cmX40cm)
*	Tubo de PVC de ½ polegada (*distância do ponto de uso do Biogás)
02 unid.	Tubos de PVC de 3 polegadas com um cotovelo
0,5 metros	Corda Grossa
03 unid.	Galão semi-preenchidos com areia

Fonte: Adaptado de Rural Costa Rica, 2010

A construção inicia-se com a escolha do local, que deverá ser plano e próximo à fonte de biomassa. Escolhido o local faz-se a abertura de um buraco de 1,5 m de largura por 3,0 m de comprimento e 2,0 metros de profundidade. Em seguida, cava-se uma vala com ângulo de 45º para a entrada da biomassa e no lado oposto cava-se outra vala com ângulo de 30º para a saída do biogás. Após este procedimento, prepara-se as paredes do biodigestor com os blocos de cimento, devendo a massa utilizada ser preparada na proporção de 09 sacos de cimento para 02 metros de areia e 01 metro de brita (9:2:1). Ao se preparar as paredes, fixam-se os tubos de entrada e saída, sendo que a tampa de plástico rígido só deverá ser acoplada à estrutura após a secagem de todo o material. Após o final do processo, coloca-se um corta chama no tubo de saída.

Após aproximadamente 20 dias do início de funcionamento do processo tem-se o biogás pronto para ser usado, lembrando que a adição de material no biodigestor deve ser diária para que se possa obter uma produção constante e suficiente para atender as necessidades da propriedade. Para a manutenção do biodigestor é importante considerar dois pontos: o primeiro é verificar constantemente se não há entrada de água de chuvas ou outras fontes, pois isso interfere na produção do biogás, e o segundo ponto consiste na verificação constante dos tubos utilizados a fim de se evitar vazamentos.

A pressão do biogás poderá ser controlada adicionando-se peso (pedras, sacos, etc.) sobre a cúpula, significando que no início do processo a cúpula poderá ficar mais baixa, pois não há grande volume de biogás dentro do biodigestor. Com o aumento da produção de biogás os pesos deverão ser retirados de maneira que a cúpula possa se expandir aumentando o tamanho do reservatório de biogás.

Atualmente existem no mercado diversas empresas que comercializam modelos de biodigestores, que pode variar desde o de alvenaria até os de lona, sendo mais práticos de instalar e utilizar. Com um custo médio de construção variando em torno de R$ 1.500,00, após entrar em funcionamento com apenas dois anos é possível recuperar todo o investimento através da economia na utilização de GLP, eletricidade, pilhas e substituição do uso da lenha.

Uma das grandes vantagens da utilização de biodigestores é que ele pode ser implantado em qualquer propriedade que possua animais para fornecer biomassa para sua alimentação. Este

modelo de tecnologia apropriada pode ser dimensionada de acordo com a demanda do agricultor ou pecuarista e sua utilização é recomendada para qualquer tipo ou tamanho de propriedade rural ou em comunidades isoladas, não atendidas pelos sistemas de distribuição de energia.

Já o biofertilizante, sua utilização em solos de baixa fertilidade e intemperizados, típicos do cerrado, resulta em benefícios como a economia com corretivos e adubos químicos, ativação da atividade microbiológica e melhoria na estrutura física, influenciando dentre outros, a capacidade produtiva do solo. Sua aplicação pode ser realizada através de pulverização ou fertirrigação, devendo o produto ser diluído nas proporções de 1:10 (uma parte de biofertilizante e 10 partes de água) com aplicações semanais.

A praticidade na construção, condução e utilização desta tecnologia associada aos benefícios econômicos e ambientais que proporciona, torna este modelo real e aplicável às condições da agricultura familiar e pequenas comunidades rurais, tendo como consequência o aumento da produtividade de lavouras e hortas além da geração alternativa de energia, promovendo assim a melhoria da qualidade de vida da população rural.

1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da disseminação de tecnologias apropriadas nas comunidades rurais familiares e das cidades, é possível a exploração de recursos naturais pré-existentes de forma eficiente por serem de fácil aplicação e baixo custo. A implantação de hortas comunitárias prima pela segurança alimentar dos produtores e suas famílias além de gerar excedentes que é comercializado em feiras livres aumentando a variedade de produtos oferecidos à comunidade. A utilização de biodigestor para geração de energia auxilia na sustentabilidade da propriedade rural por permitir a obtenção de energia de forma barata, rápida, eficaz e de fácil utilização. O fertilizante natural produzido com o biodigestor leva a diminuição dos custos de produção e preserva o meio ambiente por eliminar a necessidade da utilização dos de origem químicos industriais. Portanto, a utilização destas tecnologias apropriadas além de contribuir com a interiorização do desenvolvimento proporciona substancial aumento na renda do produtor rural e o equilíbrio entre o social, ambiental e o econômico.

REFERÊNCIAS

ABIKO, A. K. Tecnologias apropriadas em construção civil. In: **Tecnologia e materiais alternativos de construção**. FREIRE, Wesley Jorge e BERALDO, Antonio Ludovico. SP: Editora da UNICAMP, 2003.

AFONSO, C. L. K. C. **Avaliação e otimização de biodigestor. (2006).** Disponível em <www.puc-rio.br/.../Carlos%20Leonardo%20Kurdian%20Castanho%20Afonso.pdf> Acesso em: 11 de Abril de 2010.

ASSIS, F. O. **Bacia hidrográfica do Rio Quilombo: dejetos de suínos e impactos ambientais**. Curitiba: Ed. UFPR, 2004. Disponível em <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/raega/article/viewFile/3386/2715> Acesso em: 11 de Abril de 2010.

COLEN, F. **Potencial energético do caldo de cana-de-açúcar como substrato em reator UASB. 2003**. 85 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu 2003.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira.** Grãos, safra 2007/2008, Décimo Levantamento, Brasília, Julho de 2008. Disponível em <http://www.conab.gov.br> Acesso em: 17 de Março de 2010.

COSTA RICA RURAL. **Biodigestor: Construcción de un biodigestor de "media bolsa".** Costa Rica, 2009. Disponível em <http://www.ruralcostarica.com/biodigestor-2.html> Acesso em 10 de Abril de 2010.

ESPERANCINI, M. S. T.; COLEN, F.; BUENO, O. C.; PIMENTEL, A. E. B.; SIMON, E. J. Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do estado de São Paulo. Engenharia Agrícola, v.27, n.1, p.110-118, 2007.

GAIA TERRA NOVA. 2007. **Irrigação por aspersão**. Disponível em <http://gaiaterranova.blogspot.com/2007_10_01_archive.html> Acesso em: 27 de Março de 2010.

GAMA, R. **A Tecnologia e o Trabalho na História**. Editora Studio Nobel Edusp. 1986.

GOLDEMBERG, J. **Tecnologia Apropriada**. Publicado na revista "Encontros Com a Civilização Brasileira" Nº 3, 1978. Disponível em <http://eumatil.vilabol.uol.com.br/goldemberg.htm.> Acesso em: 18 de Março de 2010.

GUANZIROLI, C. *et al*., (2001). **Agricultura Familiar e Reforma Agrária no Século XXI**. Editora Garamond. Rio de Janeiro.

GUANZIROLI, C.; CARDIM, S. E. (Coord.). **Novo Retrato da Agricultura Familiar: O Brasil redescoberto.** Brasília: Projeto de Cooperação Técnica FAO/INCRA, 2000. 74 p. Disponível em <http://gipaf.cnptia.embrapa.br/publicacoes/artigos-e-trabalhos/censo-95-v-final-2000.pdf>. Acesso em: 29 de Março de 2010.

HERRERA, A. **O The generation of technologies in rural áreas**. In: **World Development**, v. 9, pp. 21-35, 1981.

MÃO NA TERRA, BLOGSPOT (2008). **Projeto Mão na Terra**. Disponível em <http://maonaterra.blogspot.com/2008_09_01_archive.html> Acesso em: 27 de Março de 2010.

MDA: Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Câmara aprova MP do biodiesel e mantém redução de impostos para agricultura familiar**. (10/03/2005). Disponível em <http://www.mda.gov.br/portal/index/show/index/cod/ 134/codInterno/6206>. Acesso em: 05 de Maio de 2008.

TURDERA, M.E.V..; DANILO Y. **Estudo da viabilidade de um biodigestor no município de dourados.** An. 6. Enc. Energ. Meio Rural 2006. Disponível em <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100062&script=sci_arttext>Acesso em: 11 de Abril de 2010.

NOGUEIRA, L. A. **Biodigestão. A alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1986. 93p.

PASSINI, J. J. **Geração e comunicação de inovações tecnológicas para a agricultura familiar.** Dissertação de Mestrado. CEFET-PR Unidade de Curitiba, 1999. Disponível em <http://www.ppgte.ct.utfpr.edu.br/dissertacoes/1999/passini.pdf >Acesso em: 18 de Março de 2010.

QUADROS, D. G. *et al*. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível**. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* [online]. 2010, vol.14, n.3, pp. 326-332. ISSN 1415-4366. <Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662010000300014&script=sci_arttext&tlng=.> Acesso em: 11 de Abril de 2010.

REVISTA GLOBO RURAL. **Passo a Passo**. Disponível em <http://revistagloborural.globo.com/GloboRural/0,6993,EEC1693046-4528-3,00.html> Acesso em: 27 de Março de 2010.

REVISTA GLOBO RURAL. **O círculo da vida**. Edição 224 - Jun/04. Disponível em <http://revistagloborural.globo.com/EditoraGlobo/componentes/article/edg_article_print/1,3916,738707-1641-1,00.html> Acesso em: 28 de Março de2010.

REVISTA PRODUÇÃO ENGENHARIA. **Biodigestores na suinocultura: uma análise de viabilidade econômica.** 2005. Disponível em <www.**revistaproducaoengenharia**.org/artigos/178_89.doc> Acesso em: 26 de Abril de 2010.

RIGBY, D & BROWN, S. (2007) '**Whatever Happened to Organic?** Food, Nature and the Market for ''Sustainable" Food'. Capitalism Nature Socialism. Vol. 18, N°. 3.

RODRIGUES, I. & BARBIERI, J. C. **A emergência da tecnologia social: revisitando o movimento da tecnologia apropriada como estratégia de desenvolvimento sustentável**. Revista de Administração Pública – REP. Rio de Janeiro 42(6): 1069-94, nov./dez. 2008.

RURALTINS – Instituto de Desenvolvimento Rural do Tocantins. **Agricultura Familiar promove o desenvolvimento sustentável no sudeste Tocantinense**. Conexão Tocantins.

Assessoria de Imprensa. 2008. Disponível em <http://conexaoto.com.br/noticia/agricultura-familiar-promove-o-desenvolvimento-sustentavel-no-sudeste-tocantinense/4277> Acesso em: 22 de Março de 2010.

RURALTINS – Instituto de Desenvolvimento Rural do Tocantins. **Ruraltins estima atender cerca de 30 mil agricultores neste ano de 2010**. Assessoria de Imprensa. 2010. Disponível em <http://jornalestrondo.com.br/noticias/interna.asp?id=388> Acesso em: 22 de Março de 2010.

SANGA, G. A. **Avaliação de impactos de tecnologias limpas e substituição de combustíveis para cocção em residências urbanas na Tanzânia**. Campinas: UNICAMP. 2004. 125p. Dissertação Mestrado.

SANTOS, F. C., et. al. **Projeto Forter: Diagnóstico Rápido e Dialogado em Comunidades Tradicionais de Natividade, Tocantins.** Planaltina – DF**:** Embrapa Cerrados, 2004. 33 p.— (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111; 132)**.** Disponível em <www.cpac.embrapa.br/baixar/1183/t.> Acesso em: 18 de Março de 2010.

SCHUMACHER, E.F. **Small is Beautiful**. Blond & Briggs, London, 1973.

Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas - SEBRAE/MS. Agência Sebrae de notícias. **Projeto Mandala é apresentado a Marcos Palmeira e índio Xavante.** (2004) Disponível em <http://asn.interjornal.com.br/noticia.kmf?noticia=2289615&canal=199> Acesso em: 28 de Março de 2010.

Secretaria da Agricultura Pecuária e Abastecimeto – SEAGRO/TO. **RELATÓRIO DAS EDIFICAÇÕES, AÇÕES E PROJETOS - SEAGRO - ANO 2007**.

Secretaria da Agricultura Pecuária e Abastecimeto – SEAGRO/TO. **Balanço Social**. Ano 2009. Palmas, 2009. Disponível em <http://www.seagro.to.gov.br/conteudo.php?id=151> Acesso em: 17 de Março de 2010

SÍTIO DAS CACHOEIRAS. **Educação e Agricultura desde 1985**. Disponível em <http://www.sitioduascachoeiras.com.br/agricultura/vegetal/composto.html> Acesso em: 27 de Março de 2010.

TRANI, P. E. *et al*. **Superfosfato simples com esterco animal: um bom fertilizante organomineral.** (2008). Disponível em <http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/Superfosfato/Superfosfato.htm> Acesso em 11 de Abril de 2010.

VARGAS, M. **Para uma Filosofia da Tecnologia**. Editora Alfa Omega, São Paulo, 1994.

CAPITULO II

UTILIZAÇÃO DE BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PROPRIEDADES AGRÍCOLAS

UTILIZAÇÃO DE BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PROPRIEDADES AGRÍCOLAS.

Joel Carlos Zukowski Júnior[3]

RESUMO

O mundo caminha gradativamente para uma crise ambiental extrema, tanto do aspecto do clima como da exploração e uso dos recursos energéticos. Desde algum tempo tem-se buscado soluções viáveis tecnicamente e economicamente para estes problemas. Dentre as possibilidades destacam-se as chamadas fontes renováveis de baixo impacto ambiental tais como aproveitamento da energia solar para geração de energia elétrica e calor, aproveitamento da energia eólica para geração de energia elétrica e energia mecânica, esta, milenar e o aproveitamento da energia da biomassa para geração de energia elétrica, seja através da queima direta, seja por gaseificação ou por biodigestão. Os grandes centros, apesar do impacto ambiental, têm disponibilidade de energia elétrica para fins múltiplos a preços competitivos, no entanto, as comunidades isoladas ou propriedades agrícolas distantes das redes de distribuição de energia não gozam do mesmo privilégio. Este trabalho apresenta um estudo de caso do uso de resíduos agrícolas para geração de energia elétrica em uma propriedade rural, visando melhorar o processo produtivo. Os resultados mostraram que, em sistemas de pequeno porte, sempre que a biomassa disponível for gratuita ou de baixo custo este tipo de aplicação é viável economicamente. No entanto para sistemas com potência de geracão acima 75KW o sistema e viável economicamente com tempo retorno de capital investido inferior a 5 anos.

Palavras-chave: Fontes Renováveis de Energia; Biomassa; Aproveitamento de resíduos Agrícolas; Geração de Energia Descentralizada; Termelétrica; Cogeração.

2.1 INTRODUÇÃO

O Brasil, por ser um país agrícola por excelência, dispõe de biomassa para usos múltiplos, seja produzida, seja resíduo de culturas. A biomassa residuária tem se mostrado um problema ambiental, principalmente no caso das culturas de arroz. O estado do Tocantins é um grande produtor de arroz. A produção de arroz no ano de 2000 foi de 171.415 ton de sequeiro e 220.503 ton de arroz irrigado, perfazendo um total de 391.918 ton. Considerando que deste montante cerca de 10% é casca, tem-se uma produção de 39.191,80 ton de casca de arroz. Nas

[3] Professor Adjunto do Mestrado em Agroenergia, UFT-Palmas. E-mail: zukowski@uft.edu.br. Centro Universitário de Palmas-TO

duas safras produziu-se 83.357,6 ton de casca de arroz. A tabela 01 mostra a evolução da safra de 2001 a 2008, bem como a estimativa de produção de casca de arroz nestas safras.

Tabela 01: Variação da Produção de Arroz no Tocantins, de sequeiro e irrigado

Ano Agrícola	Produção (ton)	Quantidade de casca (ton)	% Variação Produção
2001	360.436	36.044	-8
2002	309.321	30.932	-14,2
2003	382.435	38.244	23,6
2004	417.139	41.714	9,07
2005	463.528	46.353	11,02
2006*	265.360	26.536	-42,8
2007	364.988	36.499	-37,7
2008	421.478	42.148	15,5

Fonte: IBGE/CONAB/SEAGRO

A figura 01 mostra a evolução da produção de arroz de sequeiro e irrigado no Tocantins de 2001 a 2008. A figura 02 mostra a evolução de produção de casca de arroz neste mesmo período.

Os agricultores estão, então, diante de dois problemas: 1- a falta de energia elétrica para melhorar seus processos e 2- a falta de espaço para armazenar/processar este resíduo, visto que o tempo para decomposição é relativamente longo para ser utilizado como adubo.

A alternativa mais inteligente para solucionar este problema é a utilização desta biomassa como fonte de calor em pequenas centrais termelétricas. Queima-se o briquete de casca de arroz para gerar vapor a ser utilizado em turbinas a vapor, gera-se energia elétrica, suprindo as necessidades de energia em pequenas localidades rurais, melhoram-se os processos agrícolas, utiliza-se o vapor saturado como fonte de calor para refrigeração por absorção, ou seja, a cogeração. Produz-se vapor, gera-se energia elétrica, calor residual que seria jogado fora no condensador é reaproveitado no gerador do sistema de refrigeração por absorção para produzir efeito frigorífico. Além do aproveitamento da energia advinda da biomassa, este sistema aumentando a oferta de mão de obra, fixando o homem em sua região de origem, conseqüentemente melhorando a qualidade de vida das populações de localidades isoladas.

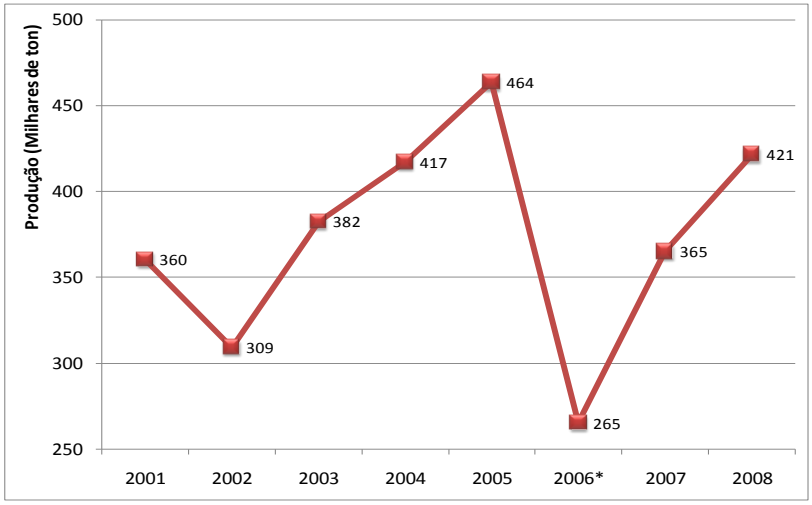


Figura 01: Evolução da Produção de Arroz de 2001 a

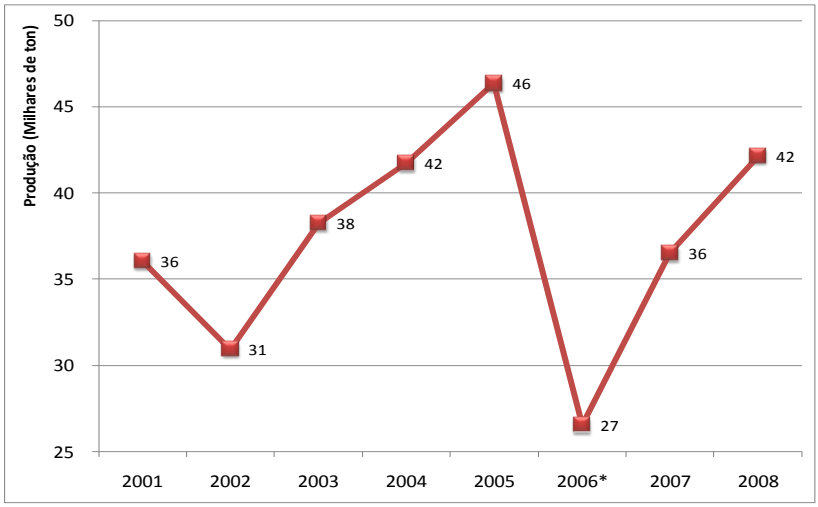


Figura 02: Evolução da Produção de Casca de Arroz de 2001 a

Devido o grande crescimento da demanda por energia elétrica, a disponibilidade de biomassa, bem como a falta de eletrificação rural, surge à possibilidade da busca de alternativas para a produção de energia elétrica através de outras fontes de energia primária dentre elas o uso de biomassa para queima em pequenas centrais termelétricas com a finalidade de uso desta energia nos processos agrícolas, inclusive a conservação de produtos agrícolas utilizando frio.

As principais características desse novo padrão de expansão do setor elétrico podem ser identificadas nas pressões sociais para com a minimização dos impactos ambientais, na necessidade de uso mais racional dos insumos energéticos e no crescente questionamento do papel exercido pelos Estados no aprovisionamento da infra-estrutura. Tais câmbios são favoráveis ao aumento da participação da biomassa na geração de energia elétrica. Com a intensa industrialização, o advento de novas tecnologias, crescimento populacional, aumento

de pessoas em centros urbanos e diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos com um gerenciamento oneroso e complexo considerando-se volume e massa acumulados, principalmente após 1980. Os problemas se caracterizavam por escassez de área de deposição de resíduos causadas pela ocupação e valorização de áreas urbanas altas, custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental (JOHN, 1999; JOHN, 2000; GÜNTHER, 2000).

A consciência ecológica, que vem aumentando dia a dia, não mais permite que os resíduos urbanos, sólidos ou líquidos, sejam lançados diretamente no ambiente, sem remover sua carga de organismos patogênicos e a maior parte possível do seu material orgânico para serem devolvidas aos mananciais de água (BETIOL e CAMARGO, 2000).

Mais recentemente a produção de energia elétrica a partir da biomassa tem sido defendida também como uma importante opção para os países em desenvolvimento (WILLIAMS & LARSON, 1992) e mesmo para os países da Comunidade Econômica Européia (GRASSI, 1993). A questão ambiental, dada pela necessidade de minimização das emissões globais de dióxido de carbono, é o ponto comum de ambas as propostas. No caso dos países em desenvolvimento, a crise econômico-financeira do setor elétrico e a necessidade de empréstimos internacionais para viabilizar a construção de novas obras, são colocadas como razões particulares.

Em condições favoráveis a biomassa pode contribuir de maneira significante para com a produção de energia elétrica. Hall (1991) estima que com a recuperação de um terço dos resíduos disponíveis seria possível o atendimento de 10% do consumo elétrico mundial e que com um programa de plantio de 100 milhões de hectares de culturas especialmente para esta atividade seria possível atender 30% do consumo. Considerando a adoção de novas tecnologias, estima-se que as centrais a biomassa, nos próximos 50 anos, poderão apresentar uma capacidade instalada similar a de origem nuclear e hidráulica (MPS, 1993). No Estado de São Paulo, 70%, até o início do século, das propriedades agrícolas, em média, são servidas de energia elétrica, estando conectadas as redes de energia. No entanto, em vários estados brasileiros, em média, menos de 10% das propriedades agrícolas estavam servidas desta fonte de energia. Após os programas governamentais Luz no Campo (gestão Fernando Henrique

Cardoso) e Luz para Todos (gestão Luiz Inácio Lula da Silva), esta condição melhorou bastante.

Em regiões mais remotas, principalmente a região amazônica, ainda não há disponibilidade de energia elétrica por fatores diversos, desde a questão ambiental ao custo de distribuição. Em situações como estas a alternativa mais inteligente para solucionar este problema é a utilização da biomassa disponível como fonte de calor em pequenas centrais termelétricas.

Onde houver disponibilidade de casca de arroz pode-se queimar a casca in natura ou o briquete de casca de arroz para gerar vapor a ser utilizado em turbinas a vapor, gera-se energia elétrica, suprindo as necessidades de energia em pequenas localidades rurais, melhoram-se os processos agrícolas, utiliza-se o vapor saturado como fonte de calor para refrigeração por absorção, ou seja, a cogeração. Produz-se vapor, gera-se energia elétrica, calor residual que seria jogado fora no condensador é reaproveitado no gerador do sistema de refrigeração por absorção para produzir efeito frigorífico. Além do aproveitamento da energia advinda da biomassa, este sistema aumentando a oferta de mão de obra, fixando o homem em sua região de origem, conseqüentemente melhorando a qualidade de vida das populações de localidades isoladas.

2.2 PEQUENAS CENTRAIS TERMOELÉTRICAS A BIOMASSA

O incremento da produção de eletricidade em pequenas centrais termoelétricas (PCT's) a biomassa foi um tema de discussão no Brasil, principalmente a nível governamental, entre o final dos anos 70 e início dos anos 80. Nesta oportunidade foi cogitado adotar tal tecnologia para os sistemas isolados, especialmente na Amazônia, a partir de madeira das reservas naturais ou de áreas reflorestadas. As tecnologias consideradas neste caso foram: a gaseificação de carvão vegetal, em gasogênios associados a grupos motogeradores de ciclo Diesel e a combustão direta em caldeiras, em ciclos Rankine com turbinas a vapor. Visando maiores capacidades e empregando ciclos a vapor, consumindo lenha picada, para unidades com capacidade acima de 5MW ou lenha em toras, para capacidades inferiores, foram projetadas ou instaladas diversas unidades na primeira metade dos anos oitenta. As centrais efetivamente instaladas estavam associadas a canteiros de obras de usinas hidroelétricas e a agroindústrias de grande porte em sistemas isolados, sempre utilizando lenha nativa cortada

da área dos reservatórios ou oriundas de frentes de desmatamento associadas à expansão da fronteira agrícola (CASTRO *et al.*, 1989).

Um exemplo emblemático das dificuldades a enfrentar na implantação de uma central termelétrica a lenha prevista para operar com lenha produzida pelo manejo sustentável de formações naturais pode ser dado pelo projeto de Manacupurú, idealizado para a cidade do mesmo nome, localizada em frente à cidade de Manaus, na margem oposta do Rio Negro. Em termos brasileiros, talvez este projeto seja aquele que mais adiante avançou na proposta de utilizar racionalmente a biomassa da floresta amazônica para geração de eletricidade em média escala e segundo uma tecnologia moderna, com turbinas a vapor multiestágio e caldeiras a lenha picada. Os equipamentos chegaram a ser licitados, contudo a descontinuidade dos recursos, cuja disponibilidade dependia de um agora extinto imposto único sobre energia, os elevados custos, da ordem de 4.500 EE.UU.$/kW, e que envolviam a infra-estrutura de manejo e produção florestal, bem como as dificuldades de dados quanto aos impactos e produtividade ambiental foram fatores de desmotivação e de insucesso para o empreendimento.

Nesta época, na expectativa de um mercado que efetivamente pouco se expandiu, um fabricante de bens de capital e sistemas energéticos chegou a apresentar uma padronização de centrais termelétricas a vapor, com unidades de 800, 1.500 e 2.400 KW, empregando caldeiras aquotubulares e turbinas a vapor multiestágio, com um consumo específico ao redor de 2,80 kg de lenha (40% de umidade) por kWh gerado (ZANINI, 1986).

Particularmente considerando o uso de locomóveis, estimou-se que apenas no Estado do Rio Grande do Sul existam atualmente cerca de 30 MW instalados em pequenas unidades de até 200-400KW consumindo resíduos de serraria e casca de arroz. Estudos realizados para esta alternativa tecnológica indicam sua competitividade frente ao suprimento convencional sempre que as distâncias até a rede da concessionária são significativas e o combustível possa ser obtido a baixo custo (NOGUEIRA e SANTOS, 1985).

A tabela 02 mostra indicadores básicos para tecnologia de sistemas de pequeno porte utilizando biomassa para geração de energia. Recomenda-se que abaixo de 700KW de potência instalada seja utilizado gasogênio como tecnologia apropriada, principalmente

porque a eficiência de turbinas em baixa potência é muito baixa, os melhores casos da ordem de 40% a 60%.

Tabela 02: Indicadores Básicos das Pequenas Centrais Termoelétricas a

Potência Instalada (kW)	Tecnologia Recomendada	Consumo anual de lenha (ton)	Custos de referência	
			($US/kW)	($US/kW)
48	Gasogênio	1.104	1.442	56,4
120	Gasogênio	2.760	743	39,0
240	Gasogênio	3.679	502	29,7
700	Turbina a Vapor	13.735	1.456	58,4
1 000	Turbina a Vapor	16.863	2.588	78,2
1 600	Turbina a Vapor	25.019	2.004	63,3
3 000	Turbina a Vapor	45.622	1.568	52,0
5 000	Turbina a Vapor	71.483	1.383	46,4

Fonte: ELETROBRÁS, 1985

Nos últimos anos pouco se tem feito em relação a esta tecnologia. Tem-se justificado que sistemas de pequeno porte apresentam baixo rendimento. Em geral em termelétricas de pequeno porte o vapor de processo é descartado sem nenhuma aplicação do calor residual. Em outros casos o vapor é condensado e reconduzido à caldeira. No entanto, o calor retirado na condensação é jogado fora. Uma proposta para melhorar a eficiência deste tipo de sistema é fazer a cogeração com sistemas de refrigeração por absorção, que demandam grande quantidade de calor e tem a vantagem de necessitar menos de 10% da energia elétrica dos sistemas a compressão para a mesma capacidade frigorífica.

2.3 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

As instalações frigoríficas por absorção não tem tido um papel expressivo na indústria de refrigeração brasileira. Este fato é parcialmente explicável pela maior complexidade do projeto em relação a uma instalação de compressão. A crescente escassez de energia elétrica e a disponibilidade de combustíveis de baixo custo, certamente, tornarão este tipo de instalação cada vez mais interessante (MÜHLE, 1998). No mercado brasileiro existem sistemas de refrigeração por absorção de pequeno porte que utilizam o par água-amônia, também conhecidos como sistemas de absorção de porte doméstico. Esta tecnologia foi desenvolvida por Baltzar Von Platen e Carl Gustav Munters que o apresentaram como trabalho de graduação (MARTINS & ALMÉN, 1998). As capacidades frigoríficas para os refrigeradores

domésticos variam usualmente entre 30 e 150 W, conforme o volume do gabinete (entre 100 e 450 litros). Sistemas de maior porte utilizam, normalmente, a tecnologia "Carré", cuja diferença da anterior é que os sistemas Platen & Munters trabalham com um gás inerte (por exemplo: N_2, H_2) juntamente com o par água-amônia e não utilizam bomba de solução (ZUKOWSKI JR., 1999).

Sob o ponto de vista energético, em certos cenários a utilização desta tecnologia pode ser mais interessante que a utilização de sistemas de refrigeração por compressão. As propriedades rurais brasileiras, bem como de outros países em desenvolvimento, em sua maioria não são providas de energia elétrica e os sistemas de refrigeração por absorção, não são grandes consumidores desta fonte de energia.

Nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, onde a necessidade de refrigeração para conservação da produção agrícola, principalmente de frutas e hortaliças, é mais evidente, a utilização de sistemas de refrigeração por absorção é uma alternativa a ser considerada. A utilização da energia solar como fonte de calor e para geração de energia elétrica é uma alternativa para a carência de energia elétrica nestas regiões e, portanto, uma forma de se viabilizar a utilização de sistemas de refrigeração por absorção, tanto para condicionamento de ar, como para tratamento pós-colheita e industrialização de produtos agrícolas. Onde houver energia térmica disponível e de baixo custo, seja ela advinda da queima direta da biomassa, de biogás, de gases de escape de motores à combustão interna, solar ou de vapor residual de processos, a tecnologia de refrigeração por absorção pode ser empregada.

2.4 DESCRIÇÃO DA PLANTA DE COGERAÇÃO

A figura 03 mostra o esquema do sistema instalado no campo experimental do CEULP/ULBRA. A planta de cogeração foi formada por uma pequena central termelétrica composta por:

1. Caldeira Domel com produção de 300kg/h à pressão de 12 kgf/cm^2 (figura 4.a);

2. Conjunto turbo-gerador modelo TEW-400 com redutor CESTARI e gerador WEG, adquirido da empresa Equipe Indústria Mecânica Ltda., com potência nominal de 35KVA, 60Hz e tensão nominal 380V trifásico (Figura 4.b);

3. Planta de refrigeração por absorção formada por três geladeiras Eletrolux, das quais uma foi modificada para ser usada como resfriadora de água (figura 5.a e 5.b);

4. Galpão para proteção da chuva e do sol de 10m *x* 5m.

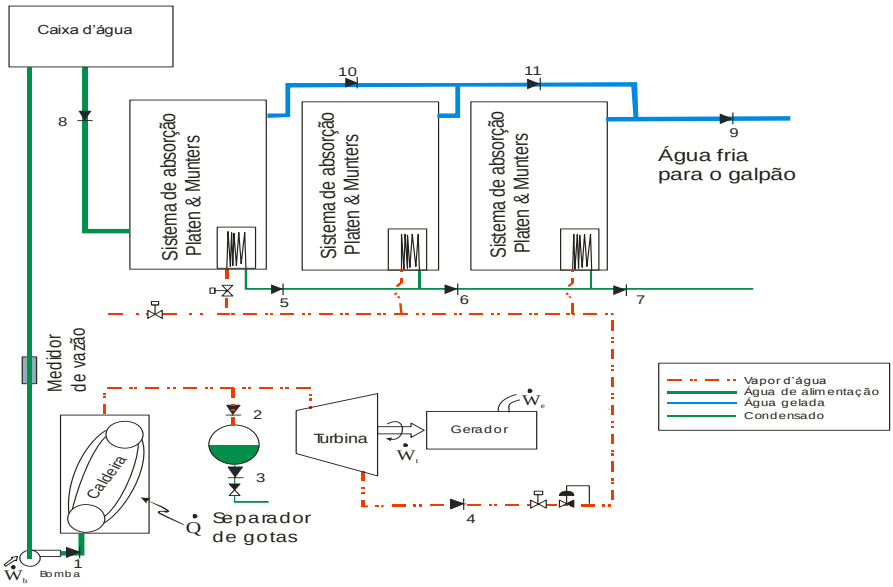


Figura 03: Esquema da Planta de Cogeração como está Instalada.

Para a realização dos testes foi instalado um sistema de aquisição de dados via computador. Foi utilizado um computador com um sistema de aquisição de dados da Lynx Tecnologia. Através de um software foi feito o monitoramento e o tratamento dos sinais provenientes dos diversos sensores instalados no sistema em estudo.

(a) (b)

Figura 04: (a) Caldeira utilizada na Micro-Central Termelétrica.
(b) Turbo-Gerador.

(a) (b)

Figura 05: (a) Geladeira Adaptada.
(b) Geladeira sem Modificações

2.5 MONTAGEM E INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE COGERAÇÃO

O sistema de cogeração usando uma pequena central termelétrica e sistema de refrigeração por absorção foi instalado no campo experimental do CEULP/ULBRA. Para abrigar o sistema foi necessário construir-se um galpão de alvenaria. O galpão foi projetado e construído considerando-se as necessidades do projeto. Com uma área de $50m^2$ (Fig. 06), abriga todo o sistema e uma sala que funciona como laboratório para abrigar o computador e sistema de aquisição de dados. Para garantir o fornecimento ininterrupto de água foi instalado um reservatório de água de 3000L. Este reservatório foi instalado em uma plataforma a 4m do solo para garantir que a bomba da caldeira trabalhe afogada e economizar energia.

A caldeira foi instalada próxima à turbina para minimizar as perdas de carga e baratear o custo com tubulações e mão de obra. A instalação foi totalmente feita pela equipe do projeto, incluindo alunos de iniciação científica do programa PROICT do CEULP/ULBRA. Para instalar foram necessários alguns preparativos, tais como base inercial, tubulações, isolamento, etc.

O sistema foi instalado segundo projeto do fabricante. A turbina, redutor e gerador foram instalados pelo fabricante em uma base metálica, sendo entregue montada. Para instalação do conjunto foi necessário construir uma base inercial, de acordo com o projeto do fabricante. A figura 07 mostra turbina.

Figura 06: Galpão onde foi instalada a Micro-Central Termelétrica

Figura 07: Turbina Assentada sobre a Base Inercial com todos os seus Acessórios e

A turbina é de um único estágio, fabricação Equipe, construída originalmente para fornecer 200CV e adaptada para fornecer, nesta planta, 40CV. Isto indica que, trocando-se o gerador e aumentando-se o fornecimento de vapor pode-se gerar pelo menos 150KVA em 380V trifásico.

2.6 OPERAÇÃO DA CALDEIRA

Depois de instalada a caldeira foi colocada em marcha, inicialmente com lenha. O sistema operou satisfatoriamente. As figuras 8.a e 8.b mostram a caldeira instalada em operação. Para se queimar briquetes em uma caldeira inicialmente projetada para lenha algumas adaptações são necessárias. As caldeiras a lenha de pequeno porte, normalmente tem grelha pequena e não precisam de insuflamento adicional, pois a compactação da lenha dentro da fornalha é muito pequena. Os briquetes apresentam densidade muito maior, tamanho menor e, portanto, grande compactação, necessitando-se de alguns ajustes no sistema. Para tanto foi instalada na

caldeira uma grelha adicional que manteve os briquetes afastados da entrada de ar. Este procedimento melhorou a queima e diminuiu a quantidade de carvão no recolhedor de cinzas. O briquete mostrou-se muito mais eficiente do ponto de vista calorífico, pois queimando lenha a caldeira consome 90kg/h e queimando briquetes consome 80kg/h.

(a) (b)

Figura 08: Queima do Briquete na Fornalha da Caldeira. (a) Vista da Câmara de Combustão e Briquetes. (b) Briquetes no Interior da Câmara de

No entanto a quantidade de carvão residual nas cinzas é maior queimando briquetes que lenha, o que indica a necessidade de insuflamento de ar adicional na fornalha. Foi emprestado pelo IML de Palmas um soprador que foi instalado no sistema para garantir uma queima total do briquete.

Apesar de não apresentar necessidade de ar adicional como o briquete, a lenha apresentou queima mais eficiente do ponto de vista da presença de carvão nas cinzas. No entanto a produção de vapor por kg de lenha foi menor que com briquete. Além da grelha adicional, para melhorar a aeração do briquete misturou-se lenha durante a queima. A queima combinada de lenha e briquete mostrou-se mais eficiente que as duas anteriores, pois a lenha impediu a compactação do briquete e este aumentou a quantidade de calor fornecida ao gerador de vapor. A quantidade total de biomassa fornecida à caldeira não sofreu variação significativa entre o queima de briquetes somente e queima combinada.

O gerador foi ligado ao sistema de acordo com as orientações do fabricante. Foram feitas várias tomadas de dados de operação, no entanto em relação à energia gerada não foi feita coleta no sistema de aquisição de dados. Para verificar se o gerador funcionaria adequadamente, considerando-se que é uma central de pequena capacidade, que pode ser

instalada em uma localidade rural isolada, adaptou-se ao sistema um painel de luzes formado por 80 lâmpadas de 100W, 220V cada (Fig. 09). Também, conectou-se ao sistema um compressor disponível no campo experimental e uma máquina de solda.

As luzes instaladas procurando-se distribuir de forma mais uniforme possível a carga entre as fases. Ao se ligar às luzes o gerador não mostrou grande variação na necessidade de vapor. Ao se conectar o compressor, com motor de 1/2hp, não se verificou variação na velocidade do gerador. Conectando-se o painel de lâmpadas e o compressor pode-se verificar uma pequena variação de velocidade no gerador. No entanto quando se ligou a máquina de solda houve necessidade de aumentar a vazão de vapor. O que se esperava, pois este equipamento consome muita energia. Considerou-se que o sistema funcionou dentro do esperado e que a tecnologia é viável e propícia.

Figura 09: Painel de Lâmpadas para Teste de Carga.

2.7 AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO SISTEMA DE COGERAÇÃO

Um investimento em equipamentos produtivos, por exemplo, pressupõe a inserção no processo produtivo da empresa, de novas tecnologias, que permitam a obtenção de um melhor desempenho tanto dos produtos como do processo de fabricação. Para tal exige que se façam estudos rigorosos no sentido de otimizar os esforços de investimentos, por fase, de modo a permitirem tomadas de decisão acertadas para o futuro da empresa (BOM *et al.*, 1992). O ciclo de desenvolvimento de um projeto de investimento é composto por três grandes fases: fase de pré-investimento, fase de investimento e a fase de exploração.

Cada uma destas três fases principais pode subdividir-se em várias etapas, algumas delas constituindo importantes atividades empresariais.

1ª Fase – Pré – Investimento

- Identificação e seleção de idéias ou esquemas com interesse – **estudos de oportunidades**.
- Preparação do anteprojeto com estudos de mercado, estudos técnicos e uma primeira aproximação dos custos de funcionamento e investimento, e acima de tudo realização de estudo do contexto aos níveis jurídicos, econômicos, financeiro, político e humano – **estudos de pré-viabilidade**.
- Formulação do projeto para decisão final com avaliações econômica, financeira e analise de risco. Deve ainda nesta fase definir alternativas variantes para o projeto, preparando-se um relatório bem fundamentado para tomada de decisão – **estudos de viabilidade**.
- Avaliação e decisão de investir.

2ª Fase – Investimento

- Preparação do projeto para execução, com estudos de engenharia, consulta de fornecedores, formação profissional, aquisição dos equipamentos e elaboração do plano de realização do projeto – **execução física do projeto**.

3ª Fase – Implementação/Exploração

- Fase de controle de implementação do projeto.
- Fase de pleno funcionamento.

Convém salientar que são desenvolvidas diversas atividades em paralelo no decorrer de cada uma das fases. A partir do momento em que as etapas iniciais de estudo de pré-investimento tenham fornecido indicações suficientemente seguras, quanto à viabilidade do projeto, passam-se-á à promoção do investimento e planificação da execução, embora o esforço dos promotores se reserve para etapa de avaliação final e para fase de investimento.

2.7.1 Fatores Econômicos

Os Sistemas de Geração devem ser submetidos a uma detalhada análise técnica-econômica para verificação de sua viabilidade. O levantamento das cargas elétricas e térmicas deve ser o mais fiel possível. Em sistemas existentes, o melhor procedimento é a verificação das contas de energia por um período mínimo de 12 meses, avaliando-se então a participação de cada

tipo de energético empregado, seu pique de demanda e sua curva horária, semanal e mensal de consumo.

Em sistemas novos, em fase de projeto, o mesmo tipo de informação é necessário, porém deve ser avaliada sempre que possível com auxilio de programas de computador para simulação energética. A simulação deverá analisar de forma dinâmica, fatores como formas de tarifação de energia elétrica, sazonalidade das cargas elétricas e térmicas, e o desempenho dos equipamentos que compõe cada alternativa (inclusive em carga parcial).

Os fatores de custo inicial a serem considerados incluem:

- Custo do capital;
- Custo inicial do Sistema de Geração, incluindo os elementos auxiliares, tais como caldeiras, trocadores de calor, unidades de absorção, bombas, controladores, etc;
- Dedução do valor do custo inicial dos elementos substituídos pelo Sistema de Geração (caldeiras convencionais, chillers elétricos, geradores de emergência, nobreaks, etc.);
- Redução de custos de componentes correlatos tais como os derivados da redução de tamanho da subestação elétrica, cabos, chaves, etc.

Os elementos básicos de custo operacional são:

- Análise dos custos de energia (elétrica e térmica) no sistema convencional e no de cogeração;
- Valor de manutenção e operação (pessoal, materiais etc.) para as duas alternativas.

Não deve ser esquecido que a análise de energia deve incluir todos os produtos gerados pelo Sistema de Cogeração (vapor, água quente, água gelada, frio, etc.), não se limitando a energia elétrica.

Os elementos de análise financeira incluem o capital próprio investido, a taxa de juros, incentivos (depreciação acelerada, impostos, etc).

A composição econômica de todos os elementos acima, tais como custo inicial, operacional, manutenção e custos financeiros por um determinado prazo (em geral de vinte anos), deve ser então comparada nas duas alternativas, e os números em geral procurados como indicadores são o IRR (Internal Revenue Rate) e o prazo de amortização. Taxas de juros atrativas com

prazos de amortização e carência adequados estão disponíveis hoje em dia para os projetos de co-geração.

Iniciando o estudo de viabilidade econômica mostraram-se os principais aspectos técnicos referentes a esse empreendimento destacando suas vantagens e desvantagens frente a outros tipos de sistemas de conversão de energia, seus custos e suas peculiaridades focando, sempre, às particularidades do estudo de caso que está sendo abordando.

2.7.2 Centrais Termelétricas

As Centrais Termelétricas podem ser classificadas atendendo os seguintes critérios:

- Produto Principal;
- Tipo de Combustível;
- Tipo de máquina térmica;
- Tipo de Caldeira;
- Potência.

2.7.3 Viabilidade Econômica

A análise econômica consiste em fazer estimativas de todo o gasto envolvido com investimento inicial, operação e manutenção, custos de combustível e receitas geradas durante um determinado período de tempo, para assim montar-se o fluxo de caixa relativo a esses investimentos, custos e receitas e determinar quais serão os indicadores econômicos com o que se espera obter com outras alternativas de investimento deste capital, pode-se neste estudo concluir sobre a viabilidade ou não do empreendimento.

2.7.4 Investimento Inicial

O gasto de investimento, tipicamente uma função da tecnologia adotada e do nível de desempenho da planta, é a soma do custo dos diversos equipamentos componentes da planta, mais os custos de implantação, que por sua vez devem incluir transporte, seguros, taxas, instrumentação e controle, obras civis, montagem, etc.

Para o caso da Termelétrica da Fazenda Experimental do CEULP/ULBRA, que está sendo analisado, tem-se uma planta composta por 01 Turbina a Vapor adaptada para fornecer 38KW e 01 gerador 30KW. O custo total do investimento inicial foi R$ 111.000,00.

2.7.5 Custos Anuais com Operação e Manutenção

Os custos anuais com operação e manutenção da planta podem ser estimados em função do investimento inicial. Adota-se esse valor como sendo 7% do custo total do investimento, 5% de manutenção 2 % de operação. Assim, estes custos totalizaram R$. 7.770,00.

2.7.6 Custo do Combustível

O combustível utilizado na planta é a biomassa residual (Palha e Casca de Arroz), e os custos com esse combustível devem ser analisados criteriosamente, pois este representa cerca de 70% dos gastos anuais totais da planta. Sabendo-se que a planta consome 80 kg/h, e o custo do briquete é de R$ 0,085 por hora, e considerando que a planta irá opera durante 8000 horas em potência máxima, o custo anual estimando para o Briquete de casca de arroz foi de R$ 54.399,46.

2.7.7 Venda de Energia Elétrica

No caso estudado toda energia gerada, 30 KW/h, será vendida a empresas permissionárias de distribuição pelo Valor Normativo gerando todas as receitas do empreendimento em questão. Existem outras opções tais como acordos bilaterais, no entanto para o âmbito desse estudo de caso adotou-se a venda de toda energia gerada pelo valor normativo, portanto sendo este o valor padrão.

A Lei 9.648 de 27 de maio de 1998 apresenta, dentre outros itens, a nova forma de relacionamento entre concessionários e autorizados de geração e permissionários de distribuição onde a compra e venda de energia passam a ser de livre negociação, observadas as condições de transição no período – 1998-2005. Dentro da legislação retro-citada existem algumas particularidades tais como a revisão dos valores de repasse no caso de mudança relevantes na cadeia de produção de energia elétrica no Brasil, que é de extrema importância considerando que o horizonte de planejamento da central em questão é de 20 anos.

Na atualização dos valores normativos a ANEEL analisou diferentes projetos de geração hidro e termelétricos adotando parâmetros econômicos – financeiros coerentes com as atuais estruturas de financiamento e prazos praticados pelos empreendedores em instalações de energia elétrica. A tabela 03 apresenta os valores normativos reposicionados para janeiro de 2001.

Tabela 03: Valores Normativos para o MWH Gerado por Diversas

FONTE	Valor Normativo	
	R$/MWh	US$/MWh
Competitiva	114,97	36,85
Termelétrica a carvão Nacional	118,96	38,13
Pequenas Centrais Hidrelétricas	126,02	40,39
Termelétrica Biomassa	142,80	45,77
Eólica	178,31	57,15
Solar Foto-Voltaica	419,73	134,53

Fonte: ANEEL, 2001

Baseado no que foi explicado acima se chegou a um valor anual de receita gerada de R$ 34.272,00 da venda da energia. Foi considerado para esse cálculo que a usina irá operar 8000 h por ano e que o valor normativo se permanecerá constante durante esses 20 anos. Como se trata de uma planta de cogeração a energia elétrica que se deixa de gastar pode ser contabilizada como receita. Comparando as duas geladeiras por absorção utilizadas com outras de mesma capacidade, mas à compressão, apresentariam um consumo de energia de 100kWh/mês. Ao mesmo custo a receita seria de R$1.322,22, perfazendo uma receita total de R$35.594,22.

2.7.8 Financiamentos

Como se trata de um empreendimento onde os custos de investimentos são altos torna-se necessário conseguir junto a entidades autorizadas, financiamentos que tornem mais atrativos empreendimentos dessa natureza.

Tendo em vista isso, se analisa um caso onde se tem um financiamento do BNDES da linha do programa de Apoio Financeiro a Investimentos Prioritários no Setor Elétrico. Esse programa tem por objetivo contribuir efetivamente para o estímulo a implantação, em curtíssimo prazo, dos projetos de expansão da capacidade instalada do sistema elétrico

brasileiro, apoiando investimentos de geração através de usinas hidrelétricas, usinas termelétricas, Cogeração e Transmissão. A taxa de juros aplicada para esses tipos de financiamentos é a TJLP (Taxa de Juros a Longo Prazo – para gastos locais) + cestas de moedas (para materiais e equipamentos importados) + spread de risco.

Para estas condições chegou-se a um valor médio de taxa de juros para o financiamento em torno de 15%, que será usado par os devidos fins no estudo de caso. Os prazos para pagamento da dívida serão determinados em função da capacidade de pagamento do empreendimento da empresa ou grupo econômico, contemplando um período de carência que pode ser de até 06 meses e um período de amortização que poderá ser de até 12 anos após a conclusão do projeto.

O nível de participação nos financiamentos para termelétricas é de no máximo 80 %. Ao se analisar uma proposta de investimento, deve ser considerado o fato de se estar perdendo a oportunidade de auferir retornos pela aplicação do mesmo capital em outros projetos. A nova proposta para ser atrativa deve render, no mínimo, o custo de capital da empresa. Para o caso, adotou-se uma TMA de 18% que é um valor comumente utilizado para esse tipo de empreendimento.

2.7.9 Valor Presente Líquido (VPL)

Representa o resultado de todos os valores do fluxo de caixa calculados para a data zero, levando em consideração a taxa de juros do período. Encontrou-se o valor de R$ -253.250,51 para a condição analisada. Este valor mostra que a usina não é viável economicamente com os valores atuais da biomassa e da energia elétrica no mercado.

2.7.10 Análise de Sensibilidade

Na analise de sensibilidade é estudado o efeito que a variação de um determinado dado de entrada pode ocasionar nos resultados. Quanto uma pequena variação num parâmetro altera drasticamente a rentabilidade do projeto, diz-se que o projeto é muito sensível a este parâmetro e poderá ser interessante concentrar esforços para obter dados menos incertos. Para análise em questão variou-se o preço do briquete, o valor normativo da energia elétrica e o investimento por kW instalado, os resultados foram comparados e apresentados em gráficos e tabelas. Os critérios adotados foram:

1. Valor original e variação de ± 20% no valor normativo;
2. Valor original e acréscimo de 20% nos investimentos;
3. Valor original e custo zero do briquete.

Como já se sabe que, para o valor de mercado do briquete ao preço normativo do kWh, a implantação de sistemas desta capacidade é inviável economicamente adotou-se as situações indicadas na tabela 04. A probabilidade do valor e investimento inicial apresentarem queda é muito menor que apresentar crescimento, portanto adotou-se somente este caso. Os indicadores econômicos calculados nesta análise foram o VPL, a TIR e o PayBack. Analisando-se a tabela 4 pode-se verificar que somente foram viáveis os casos onde o custo do briquete foi nulo, mantendo-se o investimento inicial ou aumentando-se em 20% com valores normativos originais ou com crescimento de 20%. A figura 10 mostra a comparação do valor do VPL em cada caso. Os casos 4, 5, 10 e 11 mostraram-se viáveis economicamente, conforme discutido e o valor do VPL foi relativamente pequeno em todos os casos. A figura 11 mostra a evolução da TIR em cada caso. Os valores onde aparece nulo a TIR foi inexistentes. Pode-se verificar que dentre os casos que se apresentaram viáveis o mais interessante foi o caso 5, com uma TIR de 31,3%.

Tabela 04: Parâmetros para Análise de Sensibilidade e Resultados.

Caso	Investimento	Briquetes	Valor normativo	VPL	TIR (%)	PayBack (anos)
1	Original	Original	Original	-253.250,51	-	>20
2	Original	Original	+20%	-215.145,14	-	>20
3	Original	Original	-20%	-291.355,88	-	>20
4	Original	Nulo	Original	37.936,01	24,8	3,99
5	Original	Nulo	+20%	76.041,38	31,3	3,18
7	Original	Nulo	-20%	-169,36	17,97	5,36
7	+20%	Original	Original	-275.450,51	-	>20
8	+20%	Original	+20%	-237.345,14	-	>20
9	+20%	Original	-20%	-313.555,88	-	>20
10	+20%	Nulo	Original	15.736,01	20,38	4,79
11	+20%	Nulo	+20%	53.841,38	25,97	3,81
12	+20%	Nulo	-20%	-22.369,36	14,51	6,43

Neste caso o valor do investimento não foi alterado, a receita aumentou em 20% e os custos foram somente de O&M, ou seja, biomassa gratuita. Os casos sem indicação apresentaram valores superiores há 20 anos e não são de interesse.

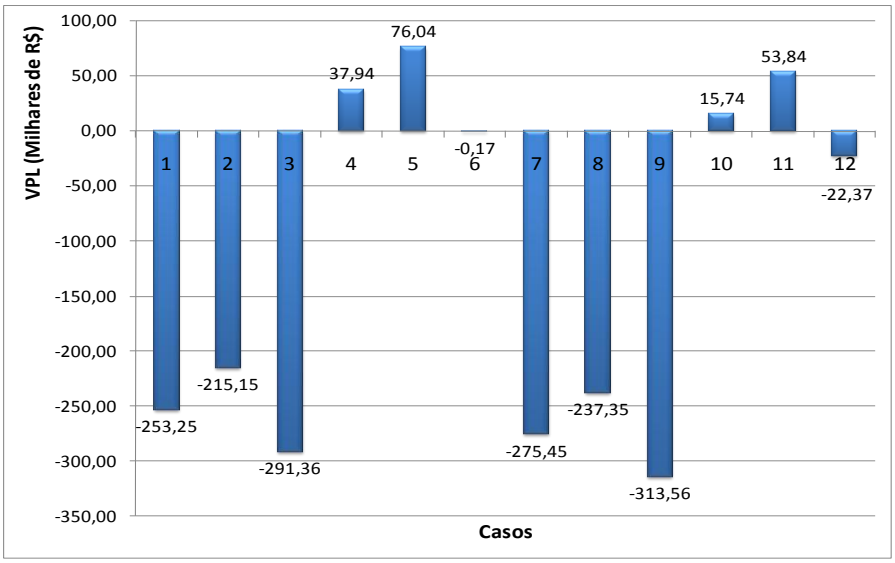


Figura 10: Variação do VPL para cada caso.

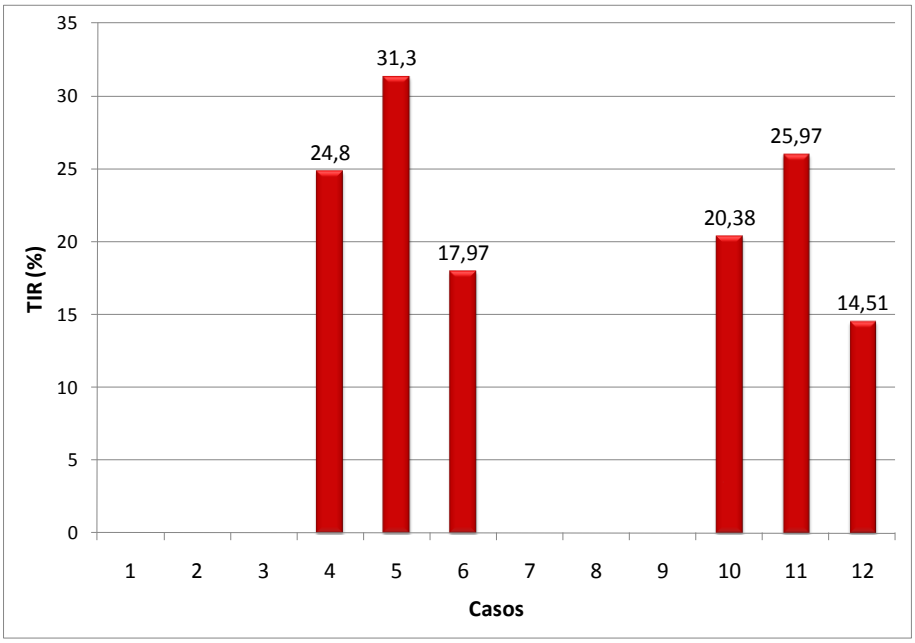


Figura 11: Evolução da TIR para cada caso.

A figura 12 mostra a evolução do PayBack. A melhor opção foi de 5,36 anos (caso 5). Neste período todo o investimento será recuperado. Além disso, o empreendimento teve a rentabilidade desejada (TMA) e ainda recebeu um adicional de R$ 76.041,38.

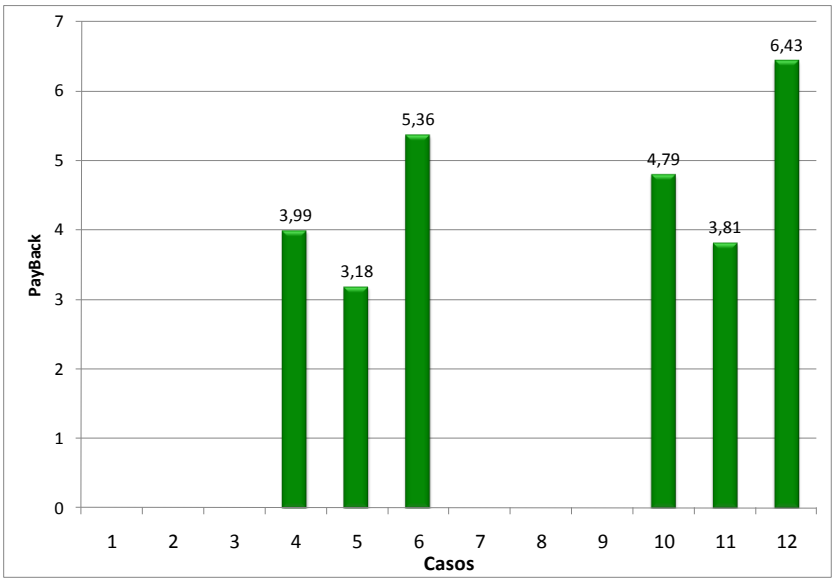


Figura 12: Evolução do Pay Back para os casos analisados.

A situação do caso 5, onde a biomassa é gratuita, aplicam-se nas propriedades agrícolas grandes produtoras de arroz que processam o arroz entregando já embalado, caso dos projetos de produção de arroz irrigado do Rio Formoso, no Tocantins. Nestes casos, muitos produtores não tinham o que fazer com a casca do arroz que eram descartadas e queimadas. A casca era simplesmente ajuntada em montanhas com várias toneladas. Com a vinda de investidores na área avícola, boa parte da casca passou a ser comercializada para aplicação em camas de frango, outra fração passou a ser vendida para olarias, tanto *in natura* como na forma de briquetes.

No entanto, uma parcela considerável ainda não tem aplicação e é descartada da forma tradicional. Como a cultura o arroz irrigado é energointensiva, a utilização desta casca para produção de energia elétrica, seja na forma de briquetes, seja *in natura*, seja em leito fluidizado, é uma possibilidade para diminuir os custos de produção e, ainda, minimizar o impacto ambiental do descarte dos resíduos. As cinzas decorrentes da combustão na caldeira podem ser utilizadas para auxiliar na calagem do solo. O CO_2 gerado será sequestrado novamente, fechando-se o ciclo do carbono.

Como visto, este sistema gerando 30KW é muito pequeno e não se apresentou viável, com acréscimo máximo de 10% no investimento inicial pode-se aumentar a potência gerada. Considerando o custo inicial do briquete, o valor mínimo que torna o sistema viável economicamente (VPL=0,00), além de melhorar a eficiência termodinâmica, é 73,23kW de

potência gerada. O valor da TIR é obviamente 18% e o Pay Back é de 5,35 anos. Portanto, instalando-se um sistema com capacidade para gerar 75KW (valor e equipamento disponível no mercado), ter-se-á um sistema economicamente viável.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dos resultados apresentados conclui-se que a tecnologia em si é interessante sob o ponto de vista de levar energia elétrica onde a rede de distribuição convencional não pode chegar ou o custo de instalação seja proibitivo.

As termelétricas de pequeno porte são uma alternativa para geração de energia em localidades onde houver biomassa disponível, seja no aspecto da geração para pequenas localidades seja do ponto de vista ambiental, pois propicia o uso da biomassa que normalmente acarretaria em grande impacto ambiental.

Verificou-se, também, que termelétricas de pequena capacidade apesar de tecnicamente viáveis, seja com locomóvel, seja com microturbinas, não se apresentam tão atrativas como as de grande porte em relação às eficiências de primeira e segunda lei da termodinâmica, a não ser que seja utilizado o vapor residual para outros fins, dando destaque a cogeração com sistemas de refrigeração por absorção. Estes sistemas utilizam uma parcela ínfima da energia elétrica gerada e aproveitam o vapor residual para agregar valor aos produtos agrícolas, por aumentar o tempo de prateleira, evitando perdas.

Termelétricas de pequeno porte utilizando biomassa como fonte de calor, especificamente briquetes de casca de arroz, somente serão viáveis economicamente se a biomassa for gratuita ou com custo muito baixo. No entanto, considerando um aumento de até 10% no investimento inicial, quantia necessária para mudar a potência gerada para 75KW, este sistema se torna viável economicamente.

REFERÊNCIAS

AMERICAN Society for Testing and Materials Manual on the use of thermocouples in temperature measurement. ASTM, 1981, cap. 8.

APHORNRATANA, S., Eames, I.W. Thermodynamic Analysis of Absorption Refrigeration Cycles Using the Second Law of Thermodynamics Method. *Int. J. Refrig.*, v. 18, n. 4, p.244-252, 1995.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineering Fundamentals Handbook. 1997 Cap. 1, 40.

ATAER E.Ö., GÖGÜS, Y. Comparative Study of Irreversibilities in Aqua-Ammonia Absorption Refrigeration Systems. *Int. Jr. Refrig*., v.14, mar. 1991.

AURACHER, H. The Application of Exergy to Refrigeration Process Optimization. In: XV Int. Congress of Refrig. Veneza, Itália.18p, set., 1979.

BARROS NETO, B. de; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. Planejamento e Otimização de Experimentos. Campinas: UNICAMP, 1995,299 p.

BARROS, R.E.; ZULAUF, W.E.; CERVONE, B.; CASTRO, M.D.L.; REIS, A.F.; BARILLARI, S.N. 1995. Usina de Processamento de Lixo com recuperaçao de Energía Elétrica e reaproveitamento de materiais, XIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energía Elétrica, Camboriú – SC.

BERMAN, C.; MOREIRA, J.G.S.; NOGUEIRA, L.A.H. 1994. Bases para arma Política Energética Sustentável de Longo Prazo: Biomassa, documento de trabalho, IEE/USP e EFEI, São Paulo.

BLICKLEY, G. J. Mass flow Measurement Aided by Coriollis Methods. *Control Engineering*, p. 53-56, abr. 1991.

CARPENTIERI, A.E. 1995. Geração de Energía Elétrica em Larga Escala com Biamassa, II Encontro para Desenvolvimento da Energia Solar, Eólica e da Biomassa no Brasil, Ministerio de Ciência e Tecnologia/Ministério de Minas e Energía/Ministerio de Relações Exteriores, Brasília, junho.

CARVALHO, J.G. Alternativas para o Uso do Gás Natural em Sistemas de Refrigeração por Absorção. *Revista ABRAVA*, 1990.

CASTRO, R.C.M.A.; CARVALHO JR, A.V.; AZEVEDO, J.B.L.; RIBEIRO, J.E.; ABREU, R.C. 1989. Perspectivas de Utilização de Biomassa para Geração de Energía Elétrica em diversas Regiões Brasileiras, X SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energía Elétrica, Curitiba.

COLE, R. A. New applications of Ammonia Refrigeration in the United States. In: Workshop de Refrigeração. Set., 1997, São Paulo.

CORTEZ, L. A. B; ZUKOWSKI JR, J. C. Histórico e Considerações Sobre Refrigeração por Absorção. In: Estudos Técnicos e Economia de Energia em Refrigeração - Aplicações da Amônia. Manaus: EDUA, 1998. Cap. 5, p. 159-196.

CORTEZ, L. A. B; ZUKOWSKI JR, J. C.; SILVA, A. da; MÜHLE, I. N. O Sistema de Refrigeração por Absorção Instalado no Hospital das clínicas da UNICAMP. In: Estudos

Técnicos e Economia de Energia em Refrigeração - Aplicações da Amônia. Manaus: EDUA, 1998a. Cap. 9, p.293-34.

CORTEZ, L. A.; PEREIRA, J.T.V.; ZUKOWSKI JR., J.C. Refrigeração por Absorção com Cogeração. In: Estudos Técnicos e Economia de Energia em Refrigeração - Aplicações da Amônia. Manaus: EDUA, 1998b. Cap. 11, p. 379-410.

CORTEZ, L.A.B.; DA SILVA, A.; LARSON, D. L. Absorption refrigeration for preservation food in the world countries. In: The Int. Meeting, ASAE, jun., 1995. Chicago, Illinois.

CORTEZ, L.A.B.; LARSON, D. L.; DA SILVA, A. Energy and Exergy Evaluation of Ice Production by Absorption Refrigeration. *Transactions of The ASAE*, v. 40, n. 2, p. 395-403, 1997.

CORTEZ, L.A.B.; MÜHLE I.N.; SILVA, A. da Refrigeração por Absorção com o Par Água-Amônia e seu Potencial no Caso Brasileiro. *Revista ABRAVA*, p. 33-38, jan/fev., 1994

DANFOSS MASSFLO. Mass Flowmeter. Sensor type MASS 1100, MASS 2100. Sinal Converter Type MASS 3000. Manual técnico apresentado pela empresa Danfoss Ltda. (São Paulo/SP).

ELETROBRÁS. 1985. Manual de Pequenas Centrais Termoelétricas (versão preliminar), 2 vol., ELETROBRÁS, Rio de Janeiro.

ELETROBRÁS. PLANO 2015. 1993. Projeto 4 - Oferta de Energía Elétrica: Tecnologías, Custos e Disponibilidade/Sub-projeto 4 - Biomassa Florestal. ELETROBRÁS, Rio de Janeiro.

GOOD, L. Como a Cogeração Pode Beneficiar o Brasil. *Revista ABRAVA*, p.26-34, set., 199

GRASSI, G. 1993. Present and Future Situation of Bioenergy in the E.C.; Strategy for Biomass Implementation, apresentação feita no VI Congresso Brasileiro de Energía, Rio de Janeiro.

HALÁSZ, J.Z. Princípios Termodinâmicos do Ciclo de Refrigeração por Absorção. UNICAMP: Publicação FEC 54/89, 1989.

HALL, D.O. 1991. Biomass Energy, Energy Policy, October, Butterworth-Heinemann Ltd., London.

HUFFORD, P.E. Absorption Chillers Improve Cogeration. *ASHRAE Journal*, p.46-53, mar., 1992.

HUFFORD, P.E. Absorption Chillers Maximize Cogeration Value. Symposium on New Application and Development of Absorption Cycles. *Transaction of the ASHRAE*, v. 97, p.428-33, 1991.

IZQUIERDO, M. Refrigeración de Autobuses Urbanos e Interurbanos Utilizando como Fuente de Energia el Calor Residual del Motor. In: Proc. Conf. Int. ECOS 9 Espanha, Zaragoza, 1992.

JABARDO, J. M. S. Amônia em Sistemas Frigoríficos. *Revista ABRAVA*, São Paulo, n. 137, p. 17-32, jan/fev., 1994.

JINGCHENG, H. Absorption Cooler in a Diesel Locomotive. In: Proc. Energy Systems and Ecology, Polonia, v.2, p. 637-652, 1993.

JORDAN, D.P.- "Exergetic evaluation of aqua-ammonia absorption refrigeration system" - Texas Tech University, 1985. Trabalho não publicado.

JORDAN, D.P. AQUAM - Programa para Cálculo de Propriedades Termodinâmicas de Água-Amônia. Texas Tech University, Lubbock, Tx., 1992.

JORDAN, D.P. Propriedades Termodinâmicas de Misturas Água-Amônia. In: Estudos Técnicos e Economia de Energia em Refrigeração - Aplicações da Amônia. Manaus: EDUA, 1998 Cap. 7, p. 239-27.

KOSHKIN, N.N. Máquinas Frigoríficas. Moscou. p. 425-480, 1968.

KOTAS,T.J. The Exergy Method of Thermal Analysis. Great Britain. 1985, p. 29-51,99-137.

LORA, E. S. Happ, J. F., Cortez, L. A, B, *Caracterização e disponibilidade da biomassa.* In: Tecnologia de conversão energética da biomassa. Manaus: EDUA, 1997. Cap. 1, p. 5-38.

MADEF Instalação Frigorífica à Absorção. 1990. Manual técnico apresentado pela empresa MADEF S.A. (Canoas/RS).

MARÇON, R. O.; ZUKOWSKI JR, J. C.; CAVALCANTE, I. R. L. Avaliação de planta térmica com biomassa (briquete de casca de arroz) – caso real "fazenda experimental do Centro Universitário Luterano de Palmas". In: AGRENERGD, 5. 2004, Campinas. Anais. Campinas, 2004.

MARTINS, G. Geladeira de absorção acionada por um fogão a lenha - um estudo teórico-experimental. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1989. Dissertação (Mestrado).

------- AMONAGUA - Programa para Cálculo de Propriedades Termodinâmicas de Água-Amônia. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1993.

------- Os Ciclos de Refrigeração por Absorção com Bomba e com Gás Inerte. 1991. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Trabalho (Curso).

MARTINS, G.; ALMÉN, C. G. Unidade de Absorção de Porte Doméstico. In: Estudos Técnicos e Economia de Energia em Refrigeração - Aplicações da Amônia. Manaus: EDUA, 1998.Cap. 10, p.343-378.

MPS. 1993. Modern Power Systems, International firms participate in Biomass Project, Modern Power Systems, December.

MÜHLE, I.N. Produção de Frio por Aquecimento Direto ou Indireto Usando Qualquer Tipo de Combustível. *Revista ABRAVA*, p.77-84, 1985.

MUTANEN, K. 1993. Opportunities for Bioenergy, Power Generation. Electric Utility Congress 93, Boston.

EGIRICAN, N. The Second Law Analysis of Absorption Cooling Cycles. *Heat Recovery systems and CHP*, v. 8, n. 6, p. 549-558, 1988.

NOGUEIRA, L.A.H.; SANTOS, A.H.M. 1986. Pequenas Centrais Termelétricas: uma análise técnica e econômica, VIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, São Paulo.

OLIVERIA JR., S. de; GOFF, P. L. Análise Exergética dos Processos de Separação/Mistura. Aplicação aos Transformadores Térmicos com Ciclo de Absorção. In: 9º Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Salvador, 1992, p. 567-57.

OLIVERIA JR., S. de; GOFF, P. L. Hybrid Systems Absorption-Compression to Upgrade Insustrial Waste Heat. In: Energy Systems and Ecology. Polônia, 1993, v. 2, p. 651-658.

PORNEALA, S; PORNEALA, D. Analysis, Calculus and Optimization Method for Thermal and Refrigerating Plants. In: Proc. Energy Systems and Ecology. Polônia, 1993, p. 659-670.

SANTANA, C. 1993. Usina Termelétrica de Formoso, (Manual de Operação e Manutenção), Departamento de Desenvolvimento Energético, CEMIG-Companhia Energética de Minas Gerais, Belo Horizonte, maio.

SILVEIRA JR., V. J.; RIOS, J. A. D. Avaliação da Sensibilidade Paramétrica de Dimensionamento e Operação de um Sistema de Refrigeração para Resfriamento de Líquido. In: Anais do III Congresso Ibero-Americano de Ar Condicionado e Refrigeração (e V Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ventilação e Ar Condicionado). 1995, v. 2, p.295-30.

SILVEIRA, J.L.; WALTER, A.C.S.; LUENGO, C.A. Um Estudo de Caso de Utilização de um Co-Gerador Compacto para a Produção Simultânea de Eletricidade e Ar Frio. in: Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia, 1993, p. 1041-50.

SZARGUT, J. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. Hemisphere Publishing Corporation, 1988, p 152-160.

THRELKELD, J. L. Thermal Environment Engineering. ed. Prentice Hall, 1970, p. 85-110.

WALTER, A.C.S.; BAJAY, S.V.; NOGUEIRA, L.A.H. 1993. Cogeração e Produção Independente de Eletricidade nas Usinas de Açúcar e Álcool: sua Viabilidade Segundo a Lógica dos Diferentes Atores Envolvidos. Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro.

WILKINSON, W.H. Absorption Cooling: A Viable Option for Today and Tomorrow. *ASHRAE Journal*, p.41-44, fev., 1994.

WILLIAMS, R. & LARSON, E.D. 1992. "Advanced Gasification-Based Biomass Power Generation and Cogeneration". In: Fuels and Electricity from Renewable Sources of Energy.

Edited by Johansson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N. & Williams, R. Island Press, Washington.

WYLEN, Van G. J.; SONNTAG, R. E. Fundamentos da Termodinâmica Clássica. São Paulo: Edgar Blücher, 1995, 589p.

ZANINI S.A. 1986. Equipamentos Pesados, Pequenas Centrais Termelétricas, catálogo técnico, Sertãozinho.

ZUKOWSKI JR., J. C. Estudo de sensibilidade em um sistema de refrigeração por absorção água-amônia, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 237 p. Tese (Doutorado).

ZUKOWSKI JR., J. C., *et al*., Instalação de uma pequena central termelétrica a biomassa e cogeração com sistema de refrigeração por absorção: alternativa para pequenas comunidades agrícolas isoladas. In: AGRENERGD, 5. 2004, Campinas. Anais. Campinas, 2004.

CAPITULO III

IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Rafael Amaral Shayani[4]
Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira[5]

RESUMO

A geração distribuída (GD) com fontes renováveis é uma forma de geração de energia estimulada por diversos países, visando gerar eletricidade em harmonia com o meio-ambiente. Quando milhares de pequenos sistemas de GD são instalados diretamente nas unidades consumidoras e conectados à rede, o fluxo de potência em um alimentador radial pode fluir em sentido reverso, situação essa não prevista quando a rede elétrica, baseada em geração centralizada, foi concebida. A elevada penetração de GD pode causar diversos impactos na rede de distribuição, tanto positivos quanto negativos, entre eles: redução da distorção harmônica, aumento de tensão na unidade consumidora, sobrecarga em alimentadores e transformadores e ilhamento não-intencional. São apresentadas recomendações gerais para o uso de GD em redes de distribuição, além de alternativas para aumentar a sua penetração no sistema elétrico. Benefícios e pesquisas necessárias sobre o assunto também são abordados.

Palavras-chave: Controle de Redes de Distribuição; Energia Solar Fotovoltaica; Fontes Renováveis; Geração Distribuída; Planejamento de Sistemas de Distribuição.

3.1 INTRODUÇÃO

A sociedade do século XXI está alerta para a necessidade de buscar o desenvolvimento sustentável em todos os aspectos da sociedade moderna, incluindo o setor elétrico. O modelo convencional amplamente adotado para a produção de energia elétrica nos países desenvolvidos baseia-se na queima de recursos de origem fóssil (e.g. carvão e derivados do petróleo), o que emite uma quantidade significativa de gases de efeito estufa. Esse modelo não deve ser seguido por países em desenvolvimento, sob o risco de agravar as complicações ambientais já existentes, tal como o aquecimento da Terra. Um esforço para ajudar a preservar o planeta, já adotado por diversos países, é o incentivo à geração de eletricidade a partir de fontes renováveis. Devido às características técnicas e econômicas das fontes utilizadas, muitas delas são inseridas nas redes elétricas na forma de geração distribuída (GD).

[4] Doutorando do Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Tecnologia do Departamento de Engenharia Elétrica. Grupo de Sistemas Elétricos de Potência (GSEP). (UnB/FT/ENE/GSEP)
[5] Professor UnB/FT/ENE/GSEP. Universidade de Brasília — *E-mail*: mago@ene.unb.br

A geração convencional de energia elétrica caracteriza-se pela existência de usinas de grande porte, instaladas próximas às fontes energéticas. Essa configuração, aqui denominada de "geração centralizada (GC)", é típica dos grandes aproveitamentos hidrelétricos. Normalmente instaladas em florestas onde rios com elevadas quedas d'água foram criados pela natureza, grandes barragens são construídas e imensos geradores são instalados, com potências da ordem de milhares de megawatts.

Como os grandes centros urbanos normalmente estão distantes das florestas, linhas de transmissão são utilizadas para que a energia gerada possa fluir por milhares de quilômetros até alcançar os consumidores. Para que as perdas elétricas nas linhas de transmissão sejam reduzidas, as tensões são elevadas para patamares de centenas de milhares de volts. O mesmo ocorre para usinas a carvão, por exemplo; além de se situarem próximas às minas, também devem ficar longe dos centros urbanos, para que a fumaça emitida não contamine o ar próximo das cidades. A vantagem dessa forma de geração de energia é que, devido às grandes dimensões dos equipamentos e da elevada quantidade de energia produzida, o ganho de escala é muito alto e a energia produzida é mais barata do que se fosse gerada por pequenas centrais elétricas.

A geração distribuída, por sua vez, caracteriza-se por pequenas usinas instaladas próximas às cargas. Quando são utilizadas fontes renováveis de energia, a GD apresenta importantes ganhos ambientais quando comparada com a queima de recursos fósseis da geração centralizada. A GD, por ser de pequeno porte, não apresenta o mesmo ganho de escala de uma grande usina, fazendo com que o preço da energia produzida seja maior. À medida que a utilização da GD aumenta, o domínio sobre suas características técnicas são aprimoradas e os custos são reduzidos. A utilização em larga escala da GD permite que a humanidade possa usufruir dos confortos disponibilizados pela energia elétrica de forma sustentável, sem a preocupação de agredir o meio-ambiente.

Considerando as vantagens ambientais proporcionadas pela GD com fontes renováveis, pode-se considerar que ela será amplamente instalada nas redes elétricas. Entretanto, uma presença significativa de GD suscita vários aspectos técnicos relativos ao funcionamento da própria rede de distribuição. Nesse capítulo são discutidos os principais impactos que a GD provoca

na rede elétrica. A geração distribuída com sistemas solares fotovoltaicos (GDFV) é utilizada como referência, por ser uma forma de GD já difundida em diversos países.

3.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (GD)

A geração distribuída pode ser considerada como o oposto da geração centralizada, pois é instalada de forma dispersa e próxima à carga. Essa seção apresenta a definição de GD, discute onde ela é instalada e analisa a possibilidade do fluxo de potência em redes radiais de distribuição fluir em sentido reverso, situação essa inexistente quando somente geração centralizada é utilizada.

3.2.1 Definição de GD

Geração distribuída pode ser definida como a denominação genérica de um tipo de geração de energia elétrica que se diferencia da realizada pela geração centralizada (GC) por ocorrer em locais em que não seria instalada uma usina geradora convencional, contribuindo para aumentar a distribuição geográfica da geração de energia elétrica em determinada região. Adicionalmente, uma fonte de energia elétrica é considerada caso particular de GD quando ela:

1. Está conectada diretamente à rede de distribuição;

2. Está conectada do lado de um consumidor conectado a algum ponto do sistema elétrico;

3. Supre cargas elétricas de uma instalação eletricamente isolada; ou

4. Está conectado diretamente à rede de transmissão, desde que, neste caso, ela não possa ser considerada caso pertencente à geração centralizada [1].

3.2.2 Localização da GD

Em sistemas elétricos interligados, as usinas da geração centralizada (GC) produzem grandes quantidades de energia que são injetadas no sistema de transmissão (Fig. 01). As distribuidoras (D) recebem a energia das linhas de transmissão e a direcionam para os consumidores. Nota-se que, para a distribuidora, não importa qual foi à usina que gerou a energia que ela entrega aos consumidores, visto que o sistema é todo interligado e a conexão com o sistema de transmissão ocorre, de forma geral, a partir de um único ponto.

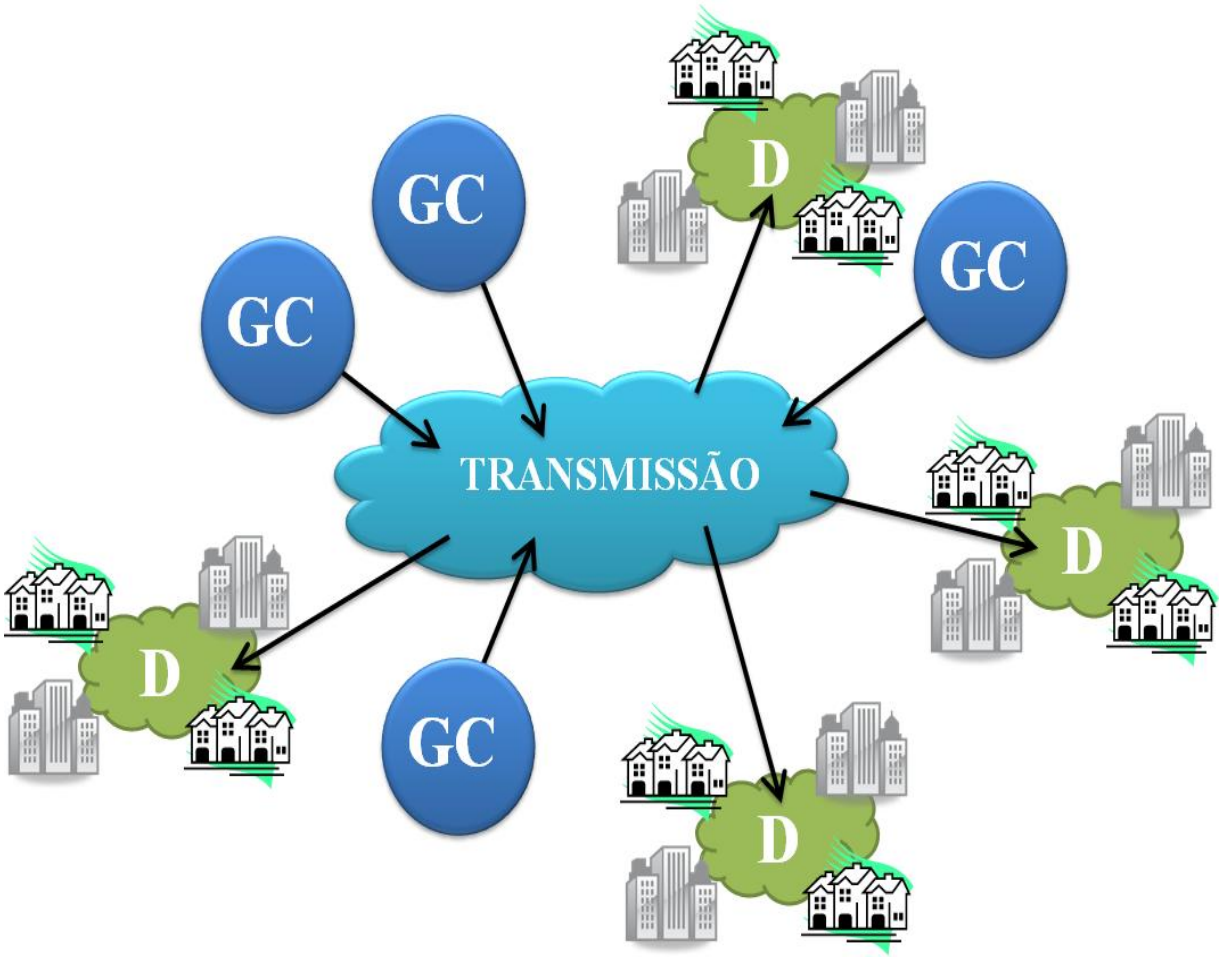


Figura 01: Esquema Simplificado de um Sistema Elétrico Interligado

As fontes renováveis de energia normalmente não se encontram concentradas em determinados locais, como ocorre com quedas d'água ou jazidas de carvão. Tomando como exemplo a energia solar, percebe-se intuitivamente que todo o globo terrestre a possui, seja em maior ou menor intensidade. O aproveitamento desse potencial renovável pode ser visto como uma "democratização" das fontes energéticas, pois determinado país não depende de possuir riquezas naturais específicas (e.g. campos petrolíferos) para poder aproveitar a energia solar. Isso faz com que o paradigma de geração centralizada seja alterado, pois a geração com fontes renováveis de energia é mais bem aproveitada se ocorrer de forma distribuída, inclusive dentro das próprias cidades que necessitam de energia.

A geração distribuída tem como característica ser localizada já próxima das cargas, para que a energia gerada possa ser diretamente consumida (Fig. 02). Além das vantagens ambientais da utilização de GD com fontes renováveis de energia, ela ainda reduz custos por não fazer uso do sistema de transmissão de energia.

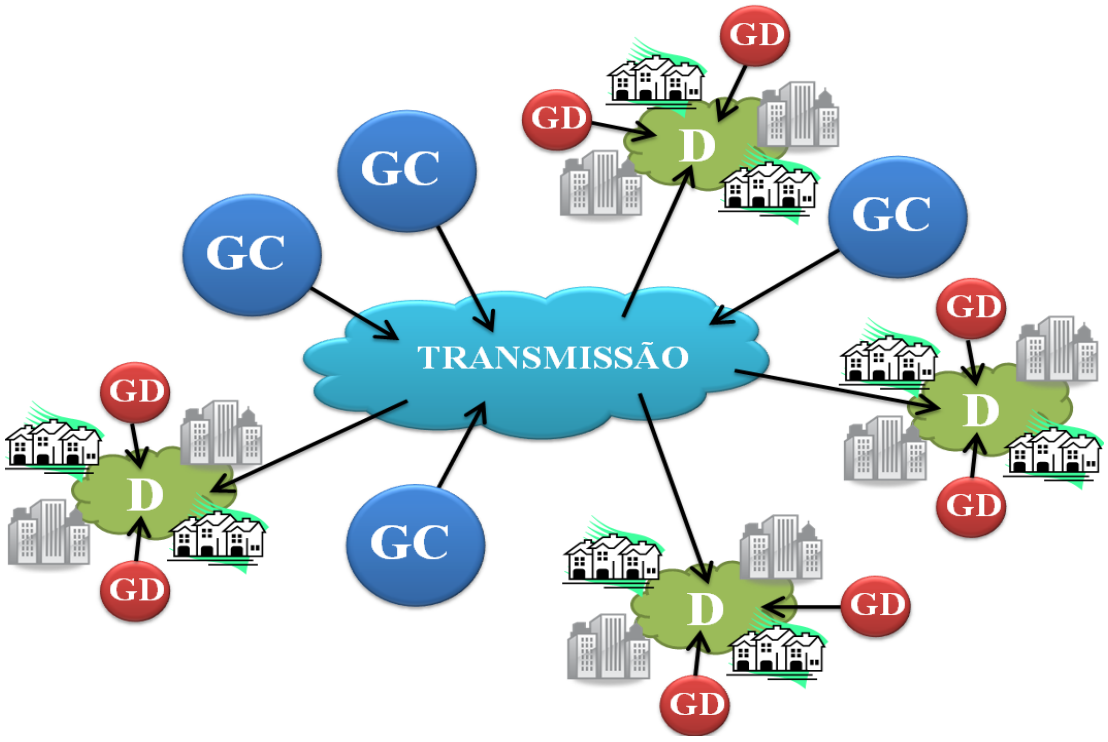


Figura 02: Esquema Simplificado de um Sistema Elétrico Interligado com Geração Distribuída

3.2.3 Modificação do Fluxo de Potência em Sistemas Radiais de Distribuição

Com a utilização da GD, passam a existir diversos pontos de geração interligados à rede de distribuição. Se essa geração fosse concentrada em determinado local da cidade, por exemplo, a distribuidora poderia tratá-la como se fosse uma segunda entrada de energia, e dispensar tratamento semelhante à energia proveniente do sistema de transmissão. Porém, se a geração distribuída é composta por milhares de painéis fotovoltaicos e pequenos geradores eólicos espalhados por toda a cidade, deve-se analisar os impactos que isso causa na rede de distribuição, visto que o sistema elétrico não foi originalmente projetado para tal situação.

Quando a energia provém de apenas uma fonte, nesse caso da geração centralizada oriunda do sistema de transmissão, o fluxo de potência em um alimentador radial típico de distribuição é sempre unidirecional, da fonte em direção às cargas (Fig. 03). Pode-se facilmente modelar o comportamento do sistema: o trecho 1-2 possui a maior quantidade de potência, pois é responsável pela alimentação das seis cargas representadas na figura. No trecho 2-3 o fluxo de potência é reduzido quando comparado ao trecho anterior, pois apenas quatro cargas precisam ser alimentadas a partir desse ponto. E no trecho final, 3-4, apenas a potência necessária para alimentar as duas últimas cargas flui pelo alimentador. Esse fluxo unidirecional de potência

permite dimensionar com facilidade os transformadores de distribuição e a seção dos condutores dos alimentadores.

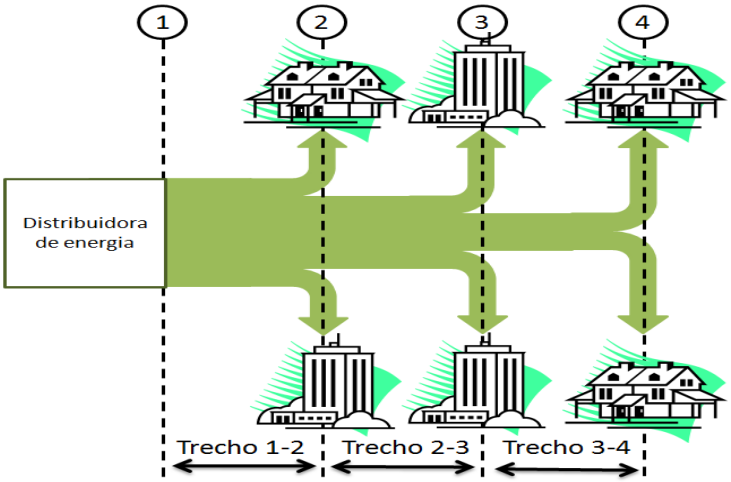
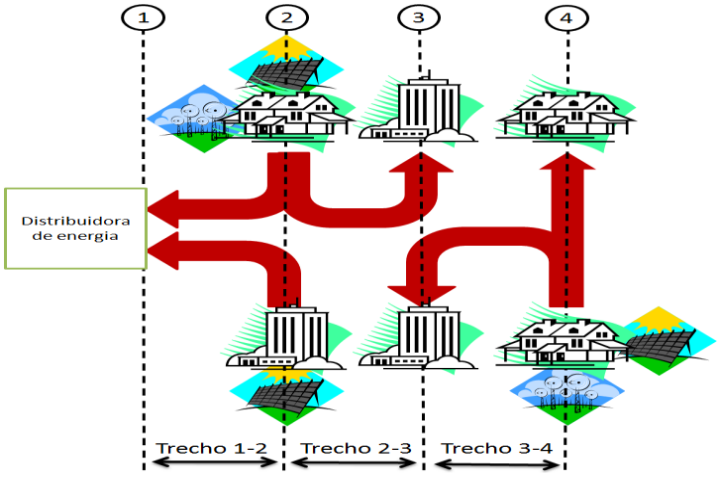


Figura 03: Fluxo de Potência em um Alimentador Radial de

Quando a geração distribuída é instalada junto às cargas, a facilidade com que o fluxo de potência é determinado altera-se drasticamente. Considere que três consumidores instalem painéis fotovoltaicos e pequenos geradores eólicos (Fig. 04). Agora, a GD atende ao consumo da carga a qual está conectada e injeta o excedente de potência produzida na rede de distribuição, alimentando outras cargas ao redor. Nessa nova situação, o fluxo de potência não é mais unidirecional (Fig. 03), e a subestação da distribuidora pode até receber ao invés de fornecer potência (Fig. 04). Tal situação gera uma série de impactos no sistema elétrico de distribuição, que devem ser analisados para que a GD possa ser instalada com segurança.



3.2.4 Exemplo d Figura 04: Fluxo de Potência em um Alimentador Radial de Distribuição com Geração Distribuída.

A inversão do fluxo de potência pode ser exemplificada considerando a instalação de geração distribuída com sistemas fotovoltaicos (GDFV). Considere as curvas de carga típicas de unidades consumidoras residenciais e comerciais, e também a irradiância[6] solar do local em estudo (Fig. 05). Nesse exemplo, a demanda máxima, tanto comercial quanto residencial, vale 1 (pu). A irradiância solar, também nessa mesma escala, apresenta potência máxima equivalente a 1 (pu). A utilização da GDFV faz com que, durante determinado horário do dia, a potência das cargas seja negativa, indicando que o excedente de potência produzido pela GDFV é injetado na rede de distribuição, fluindo em sentido reverso (Fig. 06).

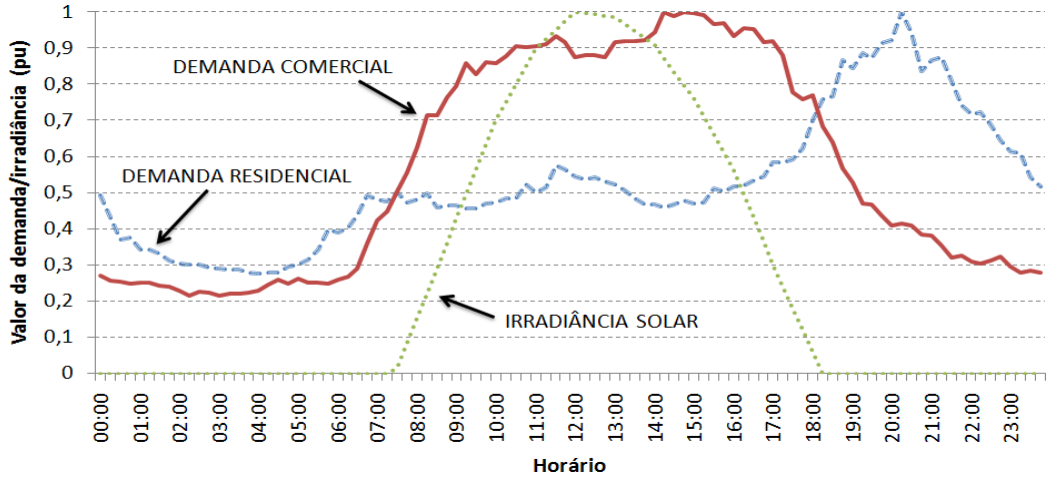


Figura 05: Valore Típicos de Demandas Residenciais, Comerciais e Irradiância

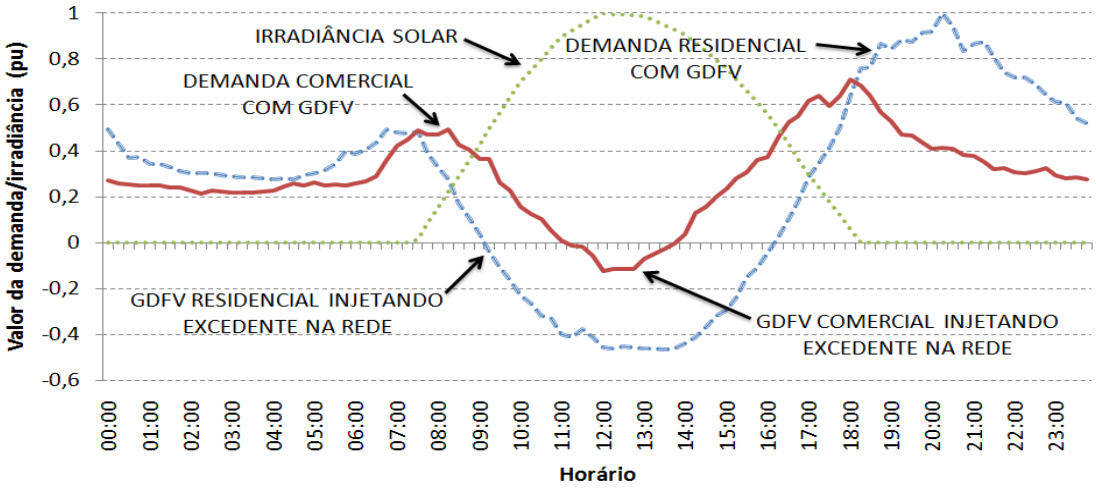


Figura 06: Demandas Residenciais e Comerciais Negativas, quando GDFV é Utilizada Injetando Potência na Rede de Distribuição.

Not ;. 06). Isso permite postergar investimentos em reforço no sistema de distribuição. A carga residencial, apesar de injetar potência na rede de distribuição por mais tempo, não reduziu sua

[6] A irradiância corresponde ao fluxo de potência da energia solar por unidade de área, fornecida em W/m^2.

demanda máxima, a qual ocorre por volta de 20h00, quando as pessoas retornam do trabalho e utilizam, entre outros equipamentos, chuveiros elétricos, torradeiras, fornos de microondas e iluminação. Como nesse horário não há mais irradiância solar, os sistemas fotovoltaicos sem acumulação de energia não contribuem para a redução da demanda máxima residencial. Essa questão pode ser contornada com a utilização de coletores solares em conjunto com painéis fotovoltaicos. Nessa configuração, além de gerar eletricidade durante o dia, energia térmica é armazenada na água, possibilitando que os chuveiros quentes possam funcionar sem eletricidade, reduzindo assim a demanda máxima residencial.

3.2.5 Instrumentos Normativos

Apesar de a GD ser uma forma de geração de energia recente, já existem instrumentos normativos internacionais e nacionais que visam regular sua conexão à rede de distribuição. Podem-se citar, como exemplos, as normas IEEE Std 1547-2003 "*IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems"* [2] e IEEE Std 929-2000 "*IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*" [3], elaboradas pelo *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

Os Procedimentos de Distribuição são documentos elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho das redes de distribuição de energia elétrica. Esse documento prevê a existência de centros de despacho de geração distribuída, com as seguintes funções [4]:

- Limitar a potência a ser injetada pela GD na rede de distribuição;
- Controlar a tensão e a potência reativa;
- Desconectar as centrais geradoras, quando necessário;
- Coordenar os procedimentos de entrada e saída de serviço; e
- Definir previsões de produção de energia.

Embora um avanço significativo já tenha sido alcançado no que tange a alguns aspectos relativos à inserção de GD em redes de distribuição, as normas e diretrizes aprovadas ainda são pequenas diante da enorme mudança que a GD provocará nos sistemas elétricos. Além disso, há que se considerar que muitos efeitos da interação entre a GD e o sistema de

distribuição não foram completamente estudados e compreendidos. Somente o intercâmbio internacional de experiências pode garantir a construção das normas técnicas adequadas, que sinalizarão aos diferentes agentes da sociedade as melhores práticas para a inserção de um grande número de GD em sistemas de distribuição.

3.3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS (GDFV)

Dentre as diversas fontes de energia existentes (e.g. eólica, biomassa, pequena central hidrelétrica e maré-motriz), os sistemas solares fotovoltaicos representam um tipo de GD por excelência, pois, quando instalados nos telhados das unidades consumidoras, sua distribuição geográfica torna-se mais espalhada que as demais fontes. Assim, a GDFV é uma tecnologia adequada para utilizar como exemplo dos impactos que a GD causa na rede de distribuição. Nessa seção, apresentam-se o crescimento dos sistemas fotovoltaicos no mundo, suas diferentes configurações e como ocorre sua conexão à rede elétrica.

3.3.1 Crescimento da Utilização da GDFV

A produção de energia elétrica a partir do Sol baseia-se no efeito fotoelétrico. Quando um material sensível a esse efeito, tipicamente uma placa de silício devidamente tratada, é exposta à irradiância solar, uma diferença de potencial contínua é gerada em seus terminais. As células solares podem ser associadas em série para maiores tensões e/ou em paralelo para maiores correntes. Por não possuirem elementos rotativos, os painéis fotovoltaicos não geram barulho durante seu funcionamento e nem emitem resíduos, não afetando o meio ambiente [5].

Desde o ano 2000 os sistemas fotovoltaicos instalados em diversos países apresentam crescimento anual superior a 30%, chegando a picos superiores a 70% (Fig. 07). A quantidade de sistemas fotovoltaicos instalados no mundo ao final de 2008 superou 13 GW, sendo que, somente em 2008, 5,56 GW foram instalados. Deste total, 6% correspondem a sistemas isolados, 33% a sistemas conectados à rede de forma centralizada e 61% a sistemas conectados à rede como geração distribuída [6]. Nota-se que a utilização de painéis fotovoltaicos em telhados de casas ou integrados à edificação vem se tornando uma prática cada vez mais comum.

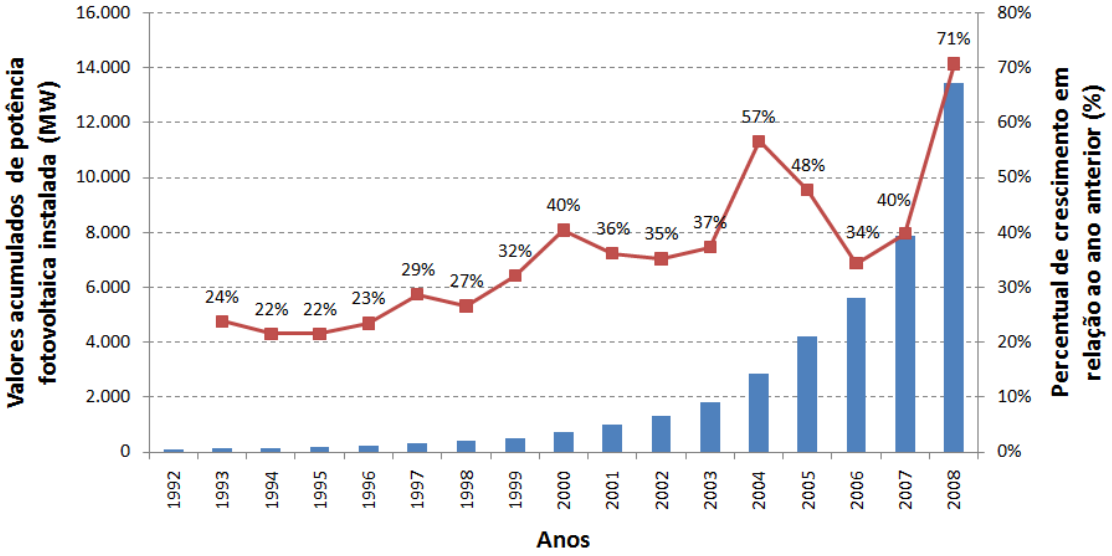


Figura 07: Potência Fotovoltaica Mundial Instalada e Percentual Anual de Crescimento.
Fonte: IEA – PVPS, 2009 (modificado)

3.3.2 Configurações da GDFV

Podem ser definidas quatro configurações diferentes de sistemas solares fotovoltaicos (Fig. 08), os quais diferem por sua finalidade [6]:

- Sistema isolado doméstico: modalidade que provê eletricidade para casas e vilas que não estão conectadas ao sistema elétrico interligado. Tipicamente a eletricidade é utilizada para iluminação, refrigeração e outras cargas de pequena potência. Uma potência típica para esta aplicação é de 1KW;
- Sistema isolado não-doméstico: primeiro uso comercial dos sistemas fotovoltaicos terrestres. Fornece energia para diversas aplicações, tais como telecomunicações, bombeamento de água, refrigerador de vacinas e sistemas de navegação;
- Sistema conectado à rede de forma distribuída: gera energia diretamente para unidades consumidoras conectadas ao sistema interligado, ou para a própria rede de distribuição. Normalmente são conectados no lado do consumidor, após o medidor, de forma integrada à edificação. A potência instalada não é determinante neste caso, pois um sistema FV de 1 MW pode ser muito grande para ser instalado em um telhado, porém não é o caso para outras formas de GD; e

- Sistema conectado à rede de forma centralizada: comporta-se como uma usina centralizada tradicional, a qual se encontra em local de irradiância privilegiada, mas distante do centro de carga. Esta configuração requer grandes áreas dedicadas para a instalação dos painéis fotovoltaicos. Os custos associados com a transmissão e distribuição da energia são os mesmos de uma grande hidrelétrica, por exemplo, inclusive com as perdas por efeito joule inerentes aos sistemas de transmissão e distribuição.

Cortesia DOE/NREL

Cortesia DOE/NREL

(a) (b)

Cortesia DOE/NREL

Cortesia DOE/NREL

(c) (d)

Figura 08: Configurações de Sistemas Solares Fotovoltaicos: (a) Sistema Isolado Doméstico, Composto por um Sistema Híbrido Solar/Eólico; (b) Sistema Isolado Não-Doméstico, Fornecendo Energia para uma Torre de Comunicação; (c) Sistema Conectado à Rede de Forma Distribuída; e (d) Sistema Conectado à Rede de Forma Centralizada nos Estados Unidos, com Potência de 8,2MW [7]
Fonte: National Renewable Energy Laboratory – NREL, 2010.

3.3.3 Exemplo de Cálculo do Potencial da GDFV

A GDFV é normalmente instalada em telhados. Como as casas normalmente possuem grandes telhados, existe área suficiente para sua instalação. Para os edifícios, cujo telhado é proporcionalmente pequeno em relação à área construída, é comum a instalação dos painéis fotovoltaicos em sua fachada, aumentando assim a área de captação da irradiância solar.

O potencial fotovoltaico que pode ser instalado em uma casa pode ser estimado da seguinte forma: **(i)** Verifica-se a área do terreno, aqui exemplificado como 300 m^2; **(ii)** Considera-se, de maneira conservadora, que pelo menos 2/3 do lote seja ocupado por estacionamento e jardins, logo a área construída com telhado é de 100 m^2 por lote; **(iii)** Supondo que metade do telhado encontra-se em posição desfavorável para captação da irradiância solar, pode-se instalar 50 m^2 de painéis fotovoltaicos em cada unidade consumidora residencial; e **(iv)** Considerando a irradiância nominal de 1.000 W/m^2 e eficiência das células solares de 10%, a área de 50 m^2 pode comportar 5 kW de potência de pico instalada.

Esse cálculo é conservativo, visto que os estacionamentos de veículos dentro dos lotes podem ter telhados fotovoltaicos. Nota-se que a área considerada para o cálculo, contemplando apenas parte dos telhados, não exige alocação de locais dedicados especificamente para a GDFV. Caso um alimentador radial de uma rede de distribuição alimente 2.000 casas, por exemplo, a potência de 10 MVA pode ser inserida nesse alimentador como GDFV.

3.3.4 Conexão da GDFV à Rede Elétrica

A conexão da GDFV à rede elétrica é um processo relativamente simples, necessitando de um conversor estático de potência (também chamado de inversor), o qual é responsável por modificar a tensão contínua produzida pelos painéis, tornando-a compatível e sincronizada com a tensão alternada da rede de distribuição (Fig. 09).

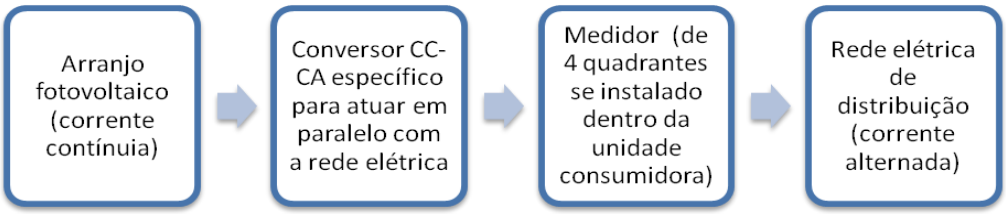

Arranjo fotovoltaico (corrente contínuia)
Conversor CC-CA específico para atuar em paralelo com a rede elétrica
Medidor (de 4 quadrantes se instalado dentro da unidade consumidora)
Rede elétrica de distribuição (corrente alternada)

Figura 09: Esquema de Ligação de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica

Por estar conectado à rede, não são necessárias baterias ou controladores de carga, essenciais em um sistema fotovoltaico isolado, visto que o sistema de distribuição fornece energia à carga quando a GDFV não é suficiente para tal, notadamente durante a noite.

Os conversores podem ser classificados em comutados pela linha ou autocomutados (Fig. 10). O tipo comutado pela linha utiliza tiristores como dispositivos de comutação, o qual permite controlar o momento de início de disparo, porém não possibilita interromper instantaneamente a condução, a qual depende da passagem da corrente pelo zero [8]. Já os conversores auto-comutados utilizam dispositivos de eletrônica de potência que controlam o instante de disparo e de bloqueio, como o transistor bipolar de porta isolada (*insulated-gate bipolar transistor* – IGBT) e o transistor de efeito de campo (*metal oxide semiconductor field effect transistor* – MOSFET).

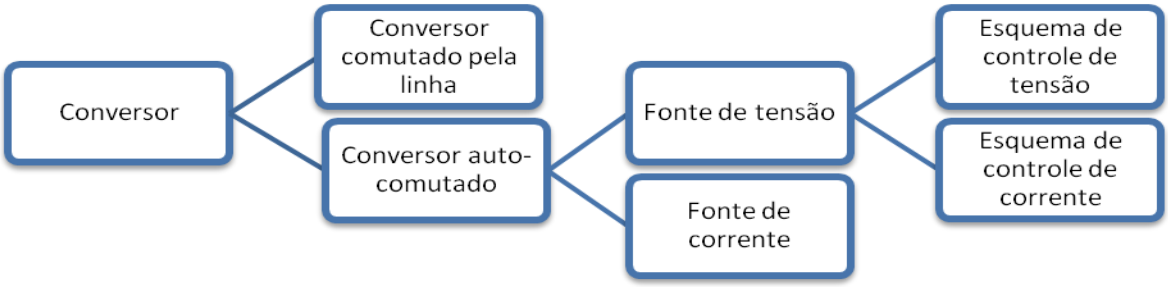


Figura 10: Classificação dos Conversores [8].

A maior parte dos conversores utilizados em GDFV são autocomutados [8]. Como podem controlar livremente a forma de onda da tensão alternada e da corrente, é possível ajustar o fator de potência de forma dinâmica e suprimir componentes harmônicas de corrente, além de apresentar comportamento robusto para operar durante distúrbios oriundos da rede da concessionária. Esses recursos reduzem os impactos negativos que a GDFV causa na rede elétrica da distribuidora.

3.4 IMPACTOS DA GD NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A interligação de uma grande quantidade de GD diretamente no sistema de distribuição, notadamente na baixa tensão, pode causar diversos impactos na rede da concessionária. Existem tanto aspectos vantajosos quanto desfavoráveis. A GDFV é utilizada como exemplo, mas as considerações apresentadas são aplicáveis a outras formas de GD que se conectam a rede através de conversores.

3.4.1 Distorção Harmônica

Como a GDFV é interligada à rede elétrica através de conversores, existe a preocupação de que componentes harmônicas possam ser injetadas no sistema de distribuição em grande quantidade, prejudicando a qualidade da energia elétrica.

3.4.1.1 Limite de Distorção Harmônica de Corrente

Existem diversas normas internacionais que regem a quantidade de harmônicas que um conversor de GD pode injetar na rede, tais como a IEEE Std 929-2000 e a IEEE Std 1547-2003. Ambas prescrevem que o limite de injeção harmônica de corrente deve atender ao prescrito pela norma IEEE Std 519-1992: *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, a qual impõe os limites apresentados na Tabela 01 [9].

Tabela 01: Limite de Distorção Harmônica de Corrente para Conversor de 6 pulsos, em Porcentagem da Corrente de Carga [9].

Ordem harmônica (h)	**Percentual máximo de distorção (%)**	
	Harmônicas ímpares	**Harmônicas pares**
$h < 11$	4,00	1,00
$11 \leq h < 17$	2,00	0,50
$17 \leq h < 23$	1,50	0,38
$23 \leq h < 35$	0,60	0,15
$35 \leq h$	0,30	0,08
Distorção total	5,00	

Devido aos limites impostos à injeção de harmônicas na rede, os conversores que atendem às normas internacionais de qualidade da energia elétrica produzem menos harmônicas do que cargas não-lineares convencionais [10].

A primeira geração de conversores utilizados para interligar a GDFV ao sistema de distribuição eram comutados pela linha, que produzem grande quantidade de componentes harmônicas de corrente. A geração seguinte passou a utilizar a tecnologia de modulação por largura de pulso (*pulse-width modulated* – PWM), a qual apresenta uma interface mais amigável à rede elétrica. A frequência de chaveamento utilizada é de 50 a 100 vezes superior à da rede, e os filtros embutidos atenuam estas componentes de alta frequência para valores que podem ser negligenciados [8, 11].

3.4.1.2 Atuação como Filtros Ativos de Distorção Harmônica

Um ponto de destaque é que os conversores, por utilizarem eletrônica de potência, apresentam o potencial de atuarem como filtros ativos de distorção harmônica, visando melhorar a qualidade da energia elétrica do sistema de distribuição, efetivamente reduzindo as harmônicas de tensão [10]. Entretanto este interesse, atualmente, é apenas teórico, pois não existe ainda benefício financeiro regulamentado para estimular seu uso [12].

3.4.2 Aumento de Tensão

Quando a potência produzida pela GD é superior à carga local, existe um excedente de potência que é injetado na rede de distribuição. Tal situação provoca a circulação de corrente no alimentador em sentido reverso ao usualmente encontrado nos alimentadores das redes de distribuição, pois passa a fluir da carga para a subestação. Como a tensão na subestação é essencialmente constante devido à atuação de reguladores, a corrente no alimentador gera uma diferença de potencial que eleva a tensão na barra de carga. Tem-se então um aumento da tensão, aqui considerado como um fenômeno oposto à queda de tensão [10].

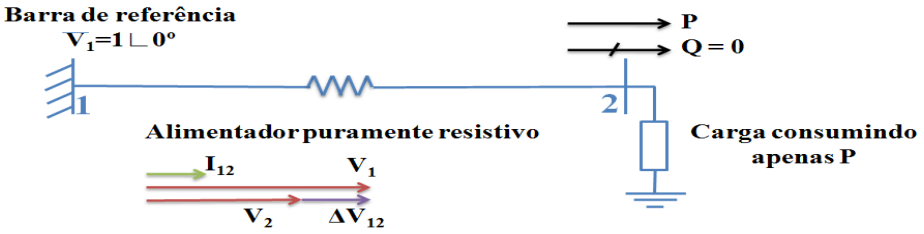
Isso pode facilmente ocorrer durante as férias de verão. Se várias casas possuem GDFV instalada para suprir a demanda dos aparelhos de ar condicionado, e muitos desses moradores viajam de férias, o consumo será reduzido, mas a GDFV continuará gerando, causando a elevação da tensão ao injetar sua potência excedente na rede elétrica.

3.4.2.1 Efeito da Impedância do Alimentador no Aumento de Tensão

O aumento de tensão apresenta comportamento diferenciado caso a GD injete potência ativa ou reativa na rede de distribuição. Considere o sistema formado por 2 barras unidas por um alimentador. A barra 1 é a referência do sistema e a barra 2 é a barra de carga, na qual está conectada a GD. O aumento de tensão na barra de carga ocorre nas seguintes situações:

- GD injetando potência ativa em alimentador resistivo (Fig. 11); e
- GD injetando potência reativa em alimentador indutivo (Fig. 12).

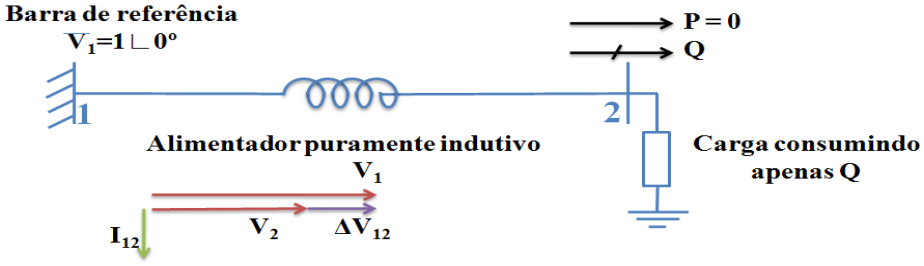
As demais situações, de injeção de potência ativa em alimentador indutivo (Fig. 13), e injeção de potência reativa em alimentador resistivo (Fig. 14), provocam pouca alteração no valor da tensão.



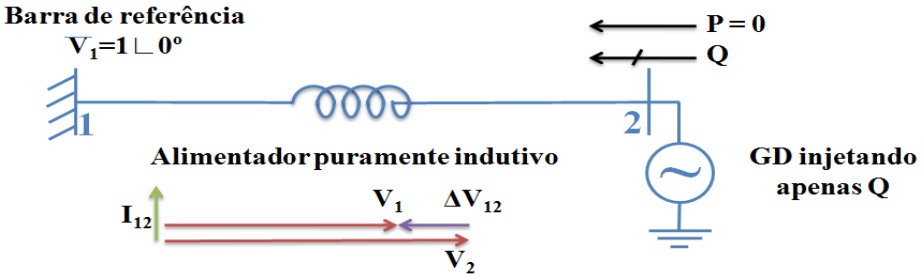
(a)

(b)

Figura 11: Variação da Tensão para Alimentador Puramente Resistivo com (a) Potência Ativa Absorvida; e (b) Potência Ativa Injetada no Sistema.

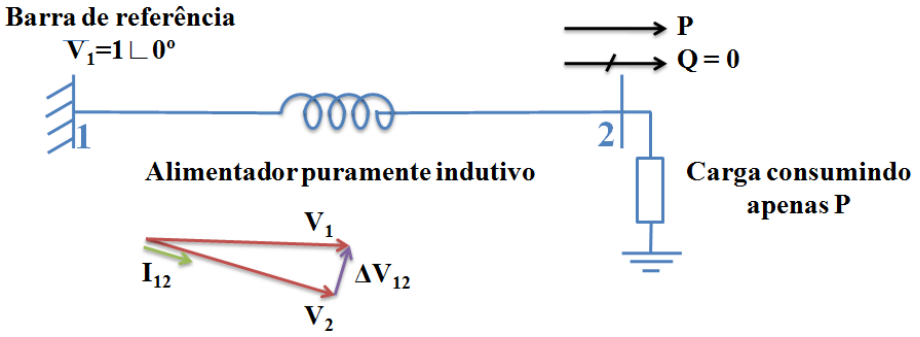


(a)

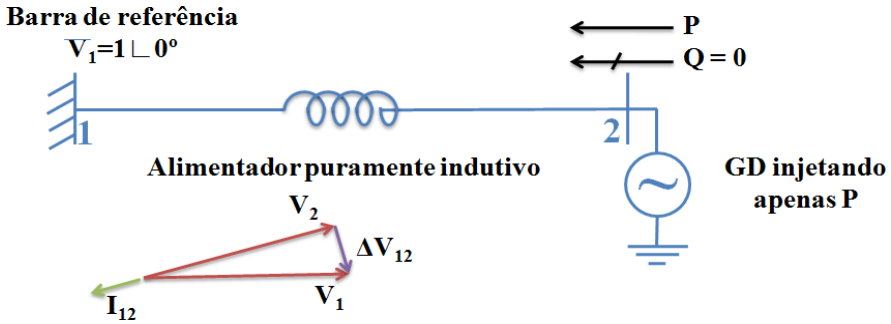


(b)

Figura 12: Variação da Tensão para Alimentador Puramente Indutivo com (a) Potência Reativa Indutiva absorvida; e (b) Potência Reativa Indutiva Inietada no Sistema.

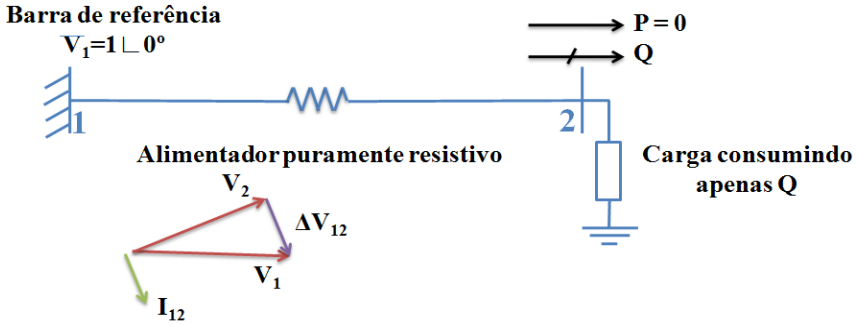


(a)

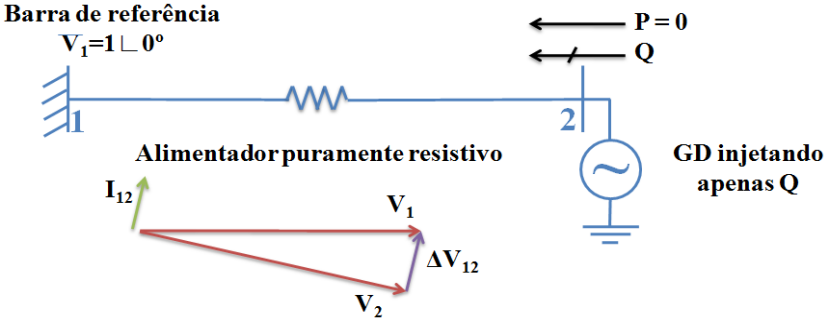


(b)

Figura 13: Variação da Tensão para Alimentador Puramente Indutivo com (a) Potência Ativa Absorvida; e (b) Potência Ativa Injetada no Sistema.



(a)



(b)

Figura 14: Variação da Tensão para Alimentador Puramente Resistivo com (a) Potência Reativa Indutiva Absorvida; e (b) Potência Reativa Indutiva Injetada no Sistema.

Os alimentadores apresentam características tanto resistivas quanto indutivas. Como a maioria dos conversores opera com fator de potência unitário, o aumento de tensão é mais acentuado nos alimentadores com maior resistência, como os utilizados nos circuitos de baixa tensão. Esses circuitos, entretanto, não costumam ser modelados nos programas de fluxo de carga, devido à complexidade existente para realizar um levantamento de campo e identificá-los fisicamente. Assim, simulações considerando apenas os alimentadores de tensão primária de distribuição (13,8 kV) podem não fornecer resultados precisos sobre o aumento de tensão na unidade consumidora dotada de GD.

3.4.2.2 Fatores que Influenciam o Aumento de Tensão

O cálculo do aumento de tensão é complexo, pois depende de diversos aspectos, entre eles:

- Valor da tensão na saída da subestação;
- Impedância do alimentador utilizado na rede de distribuição;
- Localização da GD no alimentador da rede de distribuição, pois geração conectada no final do alimentador apresenta maior aumento de tensão;
- Possibilidade do conversor utilizado pela GD modificar o fator de potência da energia produzida, para realizar o controle da tensão através do consumo de energia reativa;
- Quantidade de potência ativa e reativa injetadas na rede;
- Relação de transformação (caso o ajuste do transformador de distribuição não esteja ajustado para a tensão nominal);
- Coordenação com os dispositivos de regulação de tensão utilizados pela concessionária (bancos de capacitores e transformadores com possibilidade de mudança da relação de transformação sob carga); e
- Existência de sistema de armazenamento para absorver a potência que causa o aumento da tensão acima da faixa de valores considerada adequada.

3.4.3 Carregamento de Alimentadores e Transformadores

A instalação de GD afeta diretamente o carregamento de alimentadores e transformadores. Considere a potência que um alimentador fornece a uma carga, junto à qual se instalou uma GD operando com fator de potência unitário, isto é, gerando apenas potência ativa (Fig. 15). Na posição 1, sem GD, a carga consome potência ativa e reativa. À medida que a potência gerada pela GD aumenta, ela passa a suprir parcelas maiores de potência ativa. Assim, a

potência aparente modifica-se em direção à posição 2, onde apenas potência reativa flui através do alimentador.

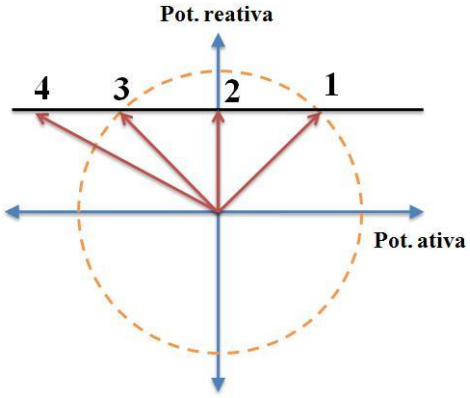


Figura 15: Modificação da Potência Aparente do Alimentador quando a GD Gera Potência Ativa

Uma vez que a GD alimenta toda a potência ativa consumida pela carga, a geração adicional de potência é injetada na rede de distribuição. Nessa situação, o gráfico atinge o quadrante de potência ativa negativa, sempre mantendo a parcela de potência reativa constante. Quando o valor da potência ativa injetada na rede de distribuição é igual à potência ativa da carga, atinge-se a posição 3 (Fig. 15). Nessa situação, a potência aparente é a mesma da situação inicial (posição 1), não gerando sobrecarga no alimentador. Porém, se a GD gera ainda mais potência ativa, ocorre um aumento adicional da potência aparente, o qual pode provocar uma sobrecarga no alimentador ou no transformador que atende a carga. Isso gera uma restrição à quantidade de GD que pode ser instalada.

Um aspecto que influencia no dimensionamento do alimentador é o fator de coincidência aplicado à demanda das cargas. A soma das potências nominais de todos os equipamentos determina a carga total instalada, mas como diversos equipamentos não operam a plena potência e nem continuamente, a demanda máxima no alimentador é sempre menor que a carga instalada. Assim, é usual que o dimensionamento de alimentadores faça uso do fator de coincidência[7] [13].

O fator de coincidência para GDFV é muito maior que o das cargas em geral, pois um bairro inteiro pode estar sujeito à mesma radiação solar, fazendo com que toda a GDFV instalada

[7] Fator de coincidência, ou fator de simultaneidade, é definido pela ABNT NBR 5460 como a razão da demanda simultânea máxima de um conjunto de equipamentos ou instalações elétricas, para a soma das demandas máximas individuais, ocorridas no mesmo intervalo de tempo especificado. Trata-se do inverso do fator de diversidade.

alcance máxima potência simultaneamente (isto é, fator de coincidência unitário). Isso pode causar sobrecarga em um alimentador dimensionado de acordo com o fator de coincidência, vindo a limitar a quantidade de GDFV que pode ser instalada [14].

3.4.4 Contribuição para a Corrente de Curto-circuito

A corrente de curto-circuito da GD depende do tipo de fonte utilizada. Por exemplo, se a energia eólica for utilizada, haverá contribuição para a corrente de curto-circuito, pois existe uma energia cinética nas pás do gerador eólico que é convertida em potência elétrica no momento do curto-circuito. No caso de sistemas fotovoltaicos, por não possuírem componentes rotativos, a corrente de curto-circuito depende do tipo de conversor utilizado.
Quando o controlador opera no esquema de controle de tensão, ao tentar manter a tensão estável durante uma falta, uma corrente elevada é disponibilizada, principalmente se possuir sistema de armazenamento de energia. Esse esquema de controle é comum em sistemas isolados, isto é, não conectados à rede elétrica.

Os conversores conectados à rede de distribuição utilizam, tipicamente, o esquema de controle de corrente, o qual não gera incremento de corrente durante a falta. Além disso, os conversores são normalmente equipados com relés de subtensão e sobrecorrente, visando identificar uma falta e cessar sua contribuição para a corrente de curto-circuito [10]. Os dispositivos de eletrônica de potência instalados no conversor permitem sua rápida desconexão da rede caso detectem algum distúrbio que exija esta ação, além de poderem ser instantaneamente reconectados [11].

3.4.5 Comportamento da GD perante Distúrbios na Rede de Distribuição

Conforme exemplificado na seção 3.3, um conjunto de unidades consumidores do tipo residencial conectado a um alimentador possui um potencial de instalação de GD de aproximadamente 10 MVA, considerando-se apenas a irradiância solar. Se a subestação possuir 10 alimentadores, a quantidade de GD instalada é da ordem de 100 MVA. Caso ocorra algum distúrbio na subestação, toda a GD instalada pode ser simultaneamente afetada.

3.4.5.1 Efeito da Desconexão da GD no Perfil de Tensão do Alimentador

As normas internacionais prescrevem que a GD deve ser desconectada caso a rede de distribuição apresente condições anormais de operação. Caso isso ocorra, a GD só deve ser reconectada após a tensão em regime permanente e a frequência da rede permanecerem dentro de valores aceitáveis por pelo menos 5 minutos [2, 3]. Entretanto, mesmo que o alimentador seja rapidamente restaurado (e.g. através de um religador automático), ainda permanecerá por cerca de 5 minutos sem a GD. Durante esse intervalo, a tensão pode ser reduzida para valores críticos, até que os dispositivos de regulação sejam acionados. Nessas condições, quando a GD for novamente conectada, a tensão pode atingir valores elevados, até que os dispositivos de regulação sejam mais uma vez acionados. Isso faz com que a unidade consumidora seja alimentada inicialmente com tensão baixa (logo após a eliminação da situação anormal) e, depois, com tensão elevada (com a reconexão da GD), prejudicando assim a qualidade da tensão em regime permanente [11].

Essa desconexão súbita pode ocorrer, por exemplo, devido a um afundamento de tensão no sistema de transmissão, o qual pode afetar toda a GD conectada no sistema de distribuição [10]. Para evitar essa situação, é necessário que a GD mantenha-se conectada durante os afundamentos de tensão, ao invés de ser imediatamente desconectada conforme prescrito pelas normas. O instante em que essa desconexão ocorre é definido pela curva de suportabilidade da GD.

3.4.5.2 Curva de Suportabilidade da GD frente a Afundamentos de Tensão

Diversas normas internacionais definem curvas de suportabilidade de tensão para GD (Fig. 16). A norma IEEE 929-2000 prescreve o desligamento da GD caso um afundamento superior a 50% ultrapasse 6 ciclos de duração. A norma IEEE 1547-2003 eleva este tempo para 10 ciclos. A norma alemã para conexão de sistemas de geração em paralelo com a rede de média tensão apresenta uma curva de suportabilidade bem menos severa, não prevendo nenhuma desconexão em até 9 ciclos, independente do valor da tensão. A área entre as duas curvas sólidas da figura 16 possibilita a desconexão da GD, porém recomenda-se que a GD continue conectada [15].

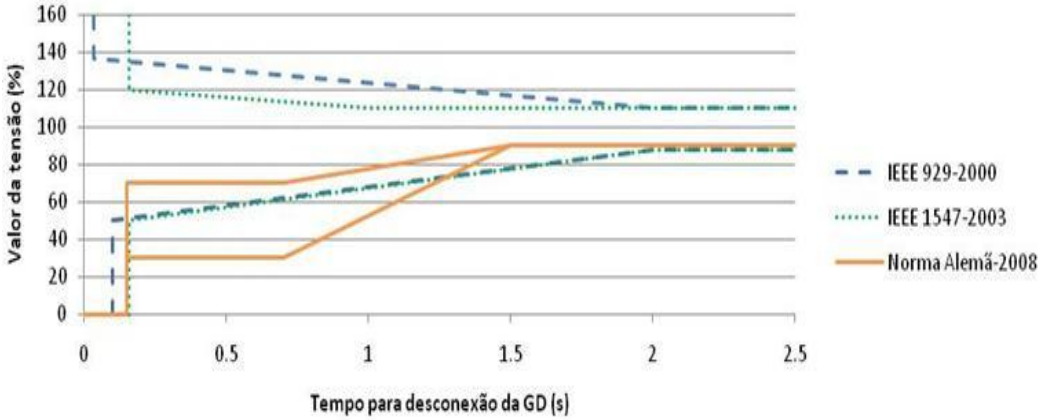


Figura 16: Curva de Suportabilidade de Tensão, indicando a Relação TempoxValor de Tensão para que a GD se Desconecte da Rede caso Distúrbios Elétricos sejam Detectados, conforme normas IEEE 929-2000,

Com a capacidade de manter-se operante durante afundamentos de tensão, a GD deixa de prejudicar o perfil de tensão do alimentador, vindo a contribuir para sua rápida restauração, uma vez finalizado o distúrbio.

3.4.6 Ilhamento Não-intencional

O ilhamento pode ser definido como uma condição em que parte da rede de distribuição, que contenha tanto carga quanto geração distribuída, mantém-se energizada, mesmo após estar isolada do restante da rede elétrica [3, 4]. Existem duas condições que devem ser simultaneamente atendidas para que ocorra o ilhamento não-intencional [10]:

- Deve haver equilíbrio entre geração e carga no momento em que a alimentação principal ficar indisponível; e
- A proteção do conversor deve falhar na detecção da condição da alimentação principal.

O ilhamento deve ser evitado, pois apresenta situações de risco, tais como [3]:

- Risco de vida para os funcionários da concessionária de distribuição durante manutenções, pois o alimentador pode manter-se energizado quando se espera que esteja desconectada de todas as fontes de energia;
- Possibilidade de danos físicos aos equipamentos da unidade consumidora, caso os parâmetros de tensão e frequência fiquem fora das faixas toleráveis, por não serem mais controlados pela concessionária durante o ilhamento; e

- Interferência no restabelecimento da rede elétrica pela concessionária, podendo gerar desarme ou danificar equipamentos, caso ocorram religamentos fora de fase.

Apesar de pesquisas mostrarem a baixa probabilidade de haver perfeito casamento entre geração e carga para que o ilhamento ocorra, os danos potenciais que podem ocorrer fazem com que este assunto mereça sempre especial atenção [3, 10].

Para prevenir o ilhamento não-intencional, os conversores são dotados de um sistema de monitoramento, instalado entre a GD e a rede de distribuição de baixa tensão, o qual permite desligar a GD quando é constatada ausência de tensão no alimentador. Um método de constatação de tensão apresentado de maneira informativa na norma IEEE Std 929-2000 orienta que os conversores conectados à rede podem possuir um sinal de desestabilização, que está constantemente tentando mudar a frequência da rede de distribuição. Enquanto conectado à rede, a concessionária, que se comporta como um barramento infinito perante a GD, neutraliza esta tendência de desestabilização. Entretanto, caso ocorra um ilhamento não-intencional, a frequência rapidamente apresentará um pequeno desvio, permitindo assim detectá-lo, tanto pela lógica de controle do conversor quanto por relés de frequência [11].

3.5 Limite de Penetração para GD

Conforme visto, a GD causa impactos, tanto positivos quanto negativos na rede de distribuição, principalmente se o montante instalado for elevado. Ainda não existe um consenso sobre o limite adequado de penetração da GD na rede elétrica. Definições, recomendações, alternativas para aumentar a penetração e necessidade de pesquisas são tratadas a seguir.

3.5.1 Definição de Penetração da GD

Um limite de penetração de 10% pode ter diferentes dimensões, em função do parâmetro utilizado para a definição do valor percentual. Embora ainda não haja consenso sobre a definição de penetração da GD, vários autores propuseram diversas definições, as quais podem ser agrupadas em três categorias distintas [16, 17]:

a) Fator de penetração como um percentual da:

- Capacidade nominal do alimentador;
- Capacidade instalada de transformação de uma concessionária;
- Potência instalada do parque gerador nacional; ou
- Potência de uma subestação.

b) Fator de penetração como um percentual da demanda máxima:

- Da subestação;
- Do alimentador; e
- Da unidade consumidora.

c) Fator de penetração diversos, como um percentual:

- Da energia gerada pela geração centralizada; ou
- Da queda de tensão no alimentador.

Nota-se que as definições propostas são bem diversificadas, visto que algumas propõem uma relação com a capacidade nominal, outras com a demanda, e outros com a energia. No caso da utilização do percentual da capacidade nominal do alimentador, surge um fator complicador adicional. Para a situação de alimentadores longos, é comum que ele tenha sua seção aumentada, para que a queda de tensão não seja elevada. Logo, em situação de carga nominal, o alimentador não estará em seu limite térmico, visto que está superdimensionado para esse critério. Isso afeta diretamente o cálculo desse fator de penetração [16].

3.5.2 – Percepções Sobre o Limite de Penetração da GD

Estudos realizados desde 1985, sobre o impacto da penetração elevada de GD, indicam diversos limites de penetração, variando desde 5% até valores acima de 50% [18]. À medida que se acumula experiência com a operação de sistemas possuindo GD interligada à rede, novas percepções sobre o limite são obtidas.

Em 2007 realizou-se uma pesquisa com 35 distribuidoras européias, englobando Áustria, França, Alemanha, Espanha, Holanda e Reino Unido. Estes países reúnem aproximadamente 98% da GDFV instalada na União Européia [12].
Dentre os diversos tópicos abordados pela pesquisa, um deles relaciona-se aos limites de

penetração de GD nas redes de distribuição, onde foi solicitado que as concessionárias informassem sua percepção sobre este limite, em relação à capacidade dos alimentadores ou dos transformadores, baseando-se na experiência que possuem. As concessionárias apresentaram diferentes respostas, resumidas nos itens a seguir [12]:

1. Em relação à capacidade do alimentador ou do transformador:

- Limitado pela potência nominal (100%) do transformador de distribuição;
- Limitado a 75% do transformador de distribuição;
- Limitado a 50% da capacidade do alimentador ou do transformador de distribuição; e
- Limitado a 30% das casas atendidas pelo alimentador, sendo que cada residência pode ter uma GD máxima de 1kWp.

2. Em relação à variação de tensão na rede:

- A penetração deve considerar o limite de variação de tensão admissível;
- O limite deve ser baseado na estabilidade de tensão, em vez de ser um valor absoluto;
- O aumento de tensão, com a GD operando com potência nominal, deve ser menor que 2%. Logo, o nível de penetração tolerável depende da impedância da rede. Tipicamente de 30% a 40% da potência nominal do transformador atende a esse critério. Se ultrapassar este limite, a rede deve ser reforçada;
- Áreas urbanas podem ter limites de penetração maiores, por possuírem redes mais robustas e, consequentemente, de menor impedância; e
- Com elevada penetração, redes de distribuição rural podem apresentar fluxo reverso ao injetarem potência na rede, necessitando de reforço no alimentador, resultando assim em uma solução de maior custo.

Interessantes elementos em comum podem ser coletados dessas diversas respostas das concessionárias européias:

- O limite de penetração não precisa ser um valor absoluto para todas as concessionárias de distribuição;
- A variação de tensão na rede é um limitador, o qual depende da impedância do alimentador; e
- A capacidade do alimentador e do transformador também são critérios limitadores.

3.5.3 Recomendações Gerais

As seguintes considerações podem ser feitas sobre o assunto, como recomendações às concessionárias de distribuição [15, 19]:

- Como regra geral, a capacidade de GD instalada na rede elétrica não deve causar problemas se for limitada a 70% da potência nominal do transformador de distribuição;
- A modificação da faixa de tensões considerada como atendimento adequado afeta o limite de penetração na rede;
- A preocupação relacionada ao aumento de tensão é acentuada quando a geração está localizada no final do alimentador, por apresentar maior impedância;
- Deve-se atentar para que a potência injetada pela GD não ultrapasse o limite de capacidade de condução dos alimentadores;
- Alimentadores que atendem unidades consumidoras conectadas no final do trecho não devem ter sua seção reduzida, conforme prescrito pelas normas técnicas, para evitar que a capacidade de injeção de potência pela GD seja restringida;
- O ajuste da relação de transformação dos transformadores para uma tensão ligeiramente inferior (aproximadamente 5V de redução na baixa tensão) aumenta a capacidade de GD que pode ser inserida, por ficar mais distante do limite de tensão máximo considerado adequado;
- O aumento de tensão nos circuitos secundários é significante, e deve ser incluído nas análises; e
- O estabelecimento de um sistema de comunicação entre a unidade consumidora e a concessionária pode auxiliar no controle de tensão.

3.5.4 – Aumento da Penetração da GD

Os limites para uma penetração elevada de GD são oriundos das características das atuais redes de distribuição, incluindo sua operação e manutenção, e escassez de ferramentas computacionais específicas para este fim. Pode-se citar como exemplos [16]:

- O controle da tensão ao longo do alimentador é obtido com a utilização de reguladores de tensão e bancos de capacitores. Para que possam interagir com a GD, eles devem ser adaptados para permitir controle de forma centralizada. Dessa forma, podem absorver com maior facilidade o impacto que a GD causa na tensão; e

- Não há infraestrutura de comunicação que permita o controle centralizado das diversas unidades de GD instaladas em determinado alimentador.

3.5.4.1 Controle Centralizado da GD e de Regulares de Tensão

De posse de um sistema de comunicação rápido e confiável, a operação e o despacho dos equipamentos de regulação de tensão e da GD podem ocorrer de forma centralizada, permitindo harmonia entre a GD e a rede de distribuição [16]. Essa é uma aplicação prática para o *smart grid*[8].

As redes elétricas do século XXI deverão operar com regulação de tensão e gerenciamento de potência reativa de forma interativa (Fig. 17). Com uma penetração elevada de GD, reguladores de tensão, mudança da relação de transformação de transformadores e bancos de capacitores devem interagir entre si e com a GD. Uma grande parcela da GD poderá participar ativamente no controle da tensão por meio do ajuste de potência ativa e reativa [16].

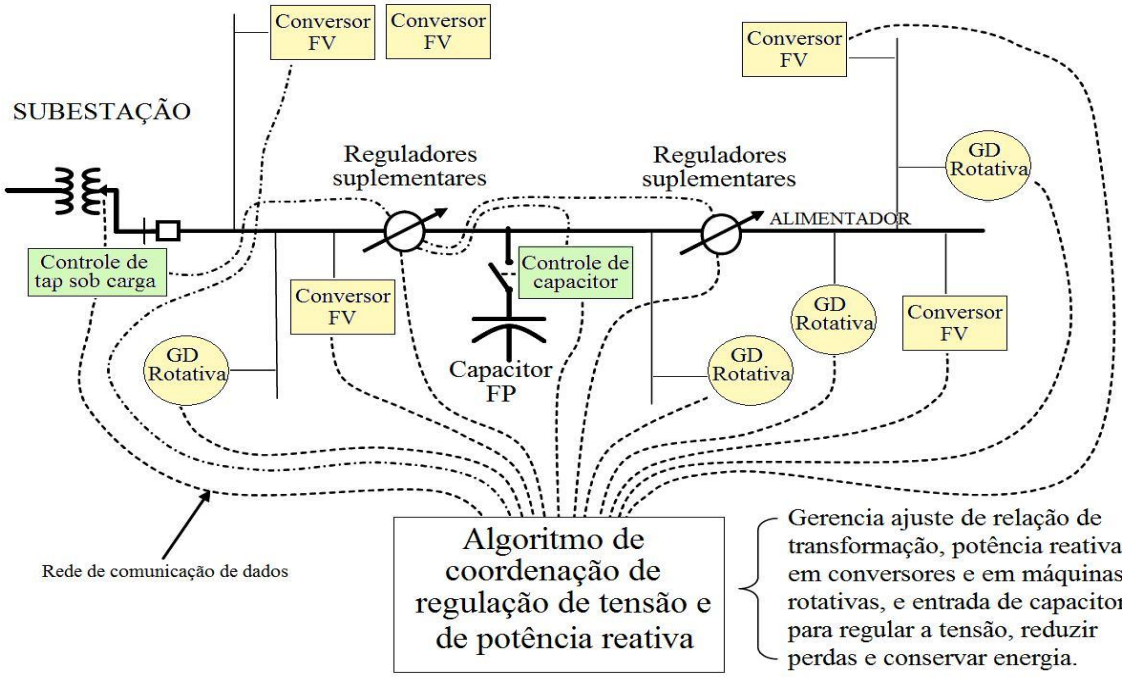

Conversor FV
Conversor FV
Conversor FV
SUBESTAÇÃO
Reguladores suplementares
Reguladores suplementares
GD Rotativa
ALIMENTADOR
Controle de tap sob carga
Conversor FV
Controle de capacitor
GD Rotativa
Conversor FV
GD Rotativa
Capacitor FP
GD Rotativa
Rede de comunicação de dados
Algoritmo de coordenação de regulação de tensão e de potência reativa
Gerencia ajuste de relação de transformação, potência reativa em conversores e em máquinas rotativas, e entrada de capacitor para regular a tensão, reduzir perdas e conservar energia.

Figura 17: Esquema de Regulação de Tensão Integrada para Alimentadores com Elevada Penetração de GD.
Fonte: McCGRANAGHAN *et al.*, 2008. (modificado)

[8] O termo smart grid remete para uma situação em que os diversos componentes de uma rede elétrica, tais como bancos de capacitores, reguladores de tensão, geração distribuída e medidores, podem interagir entre si através de um sistema de telecomunicações, o que permite operação mais eficiente da rede de distribuição.

3.5.4.2 Opções para Aumentar a Penetração da GD

Como opções para aumentar o montante de GD a ser inserido na rede de baixa tensão, visando mitigar o aumento de tensão, têm-se [10, 11, 15, 18]:

- Ajuste da relação de transformação do transformador de baixa tensão, para reduzir a tensão de saída, para aproximadamente 98% do valor nominal. Isto é válido se todos os ramais atendidos por este transformador possuírem GD;
- Controle dinâmico da relação de transformação do transformador da subestação;
- Redução da potência injetada pela GD, quando a tensão estiver no limite superior. Entretanto esta opção necessita de regras de compensação financeira por perda de receita, pois a geração instalada no final do alimentador terá sua potência limitada em um grau maior do que a GD conectada próxima à subestação, diminuindo assim a quantidade de potência que pode ser injetada;
- Redução da tensão pelo consumo de potência reativa. O fator de potência da GD pode ser controlado pelo conversor, ajustando a tensão enquanto continua fornecendo potência ativa. Entretanto, em determinadas situações, as perdas na rede podem ficar elevadas;
- Reduzir a impedância série do alimentador, aumentando a quantidade de condutores por fase, por exemplo. Esta solução reduz a queda de tensão e as perdas, porém tem como consequência óbvia o elevado custo associado. Outro aspecto importante, mas não tão evidente, é que o aumento da potência de curto-circuito no ponto de acoplamento comum afeta os dispositivos de proteção, incluindo a capacidade de interrupção dos disjuntores já instalados;
- Utilizar sistema de armazenamento, para que o excesso de geração possa ser direcionado para um meio de acumulação quando a tensão estiver acima do limite. Esta energia armazenada poderá ser utilizada em momento oportuno;
- Utilizar cargas de desvio (e.g. máquina de lavar ou secadora de roupas), que devem ser acionadas caso a GD injete elevada quantidade de potência na rede da distribuidora. Entretanto, pode ser difícil identificar cargas adequadas para este uso;
- Corrigir o nível da tensão através de rápida mudança na relação de transformação do controlador de tensão, ou rápida reconexão da GD. Pode-se estabelecer uma lógica de controle que trava a relação de transformação em uma posição pré-definida quando da saída da GD; e

- Prescrever que a nova geração de conversores possua uma curva de suportabilidade a afundamentos e elevações de tensão menos severa, evitando assim desligamentos desnecessários. A GD deve possuir os mesmos ajustes de desligamento utilizados nas unidades de geração centralizada.

Vislumbrando uma rede de distribuição futura, soluções adicionais para evitar o aumento de tensão acima dos limites podem ser obtidas utilizando a eletrônica de potência [18]:

- Transformadores dotados de eletrônica, tanto em subestações quanto em alimentadores, podem regular tensão, corrente de falta e melhorar a qualidade da energia;
- O controle centralizado da GD, através de um meio de comunicação, permite a operação centralizada e o controle da tensão; e
- Mudança da topologia das redes de distribuição, passando de radiais para configuração em malha, podem ser realizados através de interconexão por dispositivos de eletrônica de potência, visando realizar um controle apurado do fluxo de potência.

3.5.5 – Benefícios Adicionais da Penetração Elevada de GD

A utilização generalizada de GD com conversores possibilita que a eletrônica de potência tenha um papel especial na nova geração de redes de distribuição das concessionárias. A utilização de centenas, ou até milhares de conversores próximos entre si permitem um impacto positivo na rede. A nova geração destes equipamentos, além de conectar a GD à rede de distribuição, pode realizar funções adicionais, tais como [10]:

a) Melhoria na qualidade da energia elétrica através da filtragem ativa de harmônicas. Como os conversores constroem a forma de onda, podem injetar correntes harmônicas visando compensar a distorção detectada na rede de distribuição, reduzindo a distorção total.

Ao ser combinado com um sistema de armazenamento de energia, que pode ser relativamente pequeno como um capacitor, mais funções podem ser implementadas, tais como:

b) Redução do desequilíbrio de tensão. Pode ser feito, dinamicamente, o controle da simetria das fases, com a injeção de correntes propositalmente assimétricas;

c) Regulação do fator de potência, controle de energia reativa e controle do nível de tensão;

d) Redução da demanda na ponta de carga; e

e) Melhoria na confiabilidade da rede. Pode ser desejável que, no caso de um defeito na rede de distribuição, a GD continue operando, ao invés de se desconectar. Desta forma, possibilita-se a operação isolada intencional e controlada, funcionando como sistema ininterrupto de energia (*no-break*) para cargas essenciais, tais como computadores, além de manter o funcionamento de cargas específicas, como bombeamento d'água. Um mercado potencial para esta tecnologia abrange redes de distribuição de pouca confiabilidade, que apresentam desligamentos constantes e demorado tempo de restabelecimento.

3.5.6 – Pesquisas Adicionais

Pesquisas adicionais, em diversos tópicos relacionados ao limite de penetração de GD em redes de distribuição, são necessárias. Entre os principais tópicos a pesquisar, podem-se citar [10, 19, 20]:

- Avaliar o efeito do aumento da tensão na rede de distribuição para elevada penetração de GD através de mais estudos e medições. Devem ser consideradas diversas configurações de rede elétrica (urbana, rural, de diferentes países), para prover métodos de avaliação da penetração de GD máxima ou ótima;
- Modificar a forma como o planejamento, operação e controle das redes de distribuição são feitas, para que fiquem aptas a incorporarem elevada penetração de GD. Existe a necessidade de rever, alterar e adaptar, onde necessário, estruturas e procedimentos utilizados atualmente;
- Desenvolver melhores práticas para que as técnicas de regulação de tensão atualmente utilizadas sejam conciliadas com a elevada penetração de GD, abrangendo várias topologias de rede;
- Criar uma série de estudos de caso de referência, para que testes em programas computacionais possam ser simulados e comparados; e
- Considerar a presença de penetração elevada de GD com fontes intermitentes de energia (e.g. solar ou eólica) em programas de fluxo de carga. A complexidade envolvendo o comportamento no tempo e localização da GD necessita de muitos estudos adicionais, pois um simples valor de geração e de carga não é suficiente para determinar o impacto da GD na rede de distribuição. Para realizar um estudo mais apurado, deve-se possuir detalhado conhecimento das curvas de carga e de geração, além de utilizar técnicas para prever seus

comportamentos em bases diárias (diferenciando dias úteis de finais de semana e feriados) e sazonais. Na maioria dos casos, planejadores de redes de distribuição deverão executar estudos simulando o comportamento de hora em hora, para um ano inteiro, a fim de avaliar o real impacto da GD.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geração distribuída a partir de fontes renováveis de energia representa uma opção atraente para garantir a oferta de energia elétrica e o crescimento sustentável da sociedade moderna. As vantagens técnicas e econômicas são tantas, que não é um exagero considerar a presença dessas fontes permeando todo o sistema de distribuição em um horizonte de longo prazo. Por outro lado, novas tecnologias surgem a todo o momento, favorecendo ainda mais a disseminação dessas fontes. No entanto, os procedimentos e modelos atualmente adotados para o planejamento e a operação de sistemas elétricos ainda não contemplam adequadamente a penetração elevada da geração distribuída em redes de distribuição.

Este capítulo evidenciou algumas deficiências em ferramentas computacionais, procedimentos operativos, diretrizes para instalação e operação da geração distribuída, entre outros tópicos. Em conseqüência, estudos e pesquisas devem ser realizados com o objetivo de preencher as lacunas apontadas, produzindo o conhecimento científico e tecnológico que permitirá a sociedade do futuro usufruir de fontes praticamente inesgotáveis através de sistemas elétricos seguros, confiáveis e ambientalmente amigáveis.

REFERÊNCIAS

[1] SEVERINO, Mauro Moura. *Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas da Amazônia*. Publicação PPGENE.TD 027/08. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

[2] IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Std 1547-2003: IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*. 2003. Disponível em: <ieeexplore.ieee.org>. Acesso em: 29 de Dezembro de 2008.

[3] IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Std 929-2000: IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*. 2000. Disponível em: <ieeexplore.ieee.org>. Acesso em: 29 de Dezembro de 2008.

[4] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa n° 395/2009. Aprova a Revisão 1 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, e dá outras providências, de 15 de Dezembro de 2009. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 30 de Dezembro de 2009.

[5] SHAYANI, Rafael Amaral. *Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células.* Publicação PPGENE.DM 265/06. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

[6] IEA-PVPS - International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme. *Trends in photovoltaic applications: Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2008*. Report IEA-PVPS T1-18:2009. Disponível em: <www.iea-pvps.org>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2010.

[7] National Renewable Energy Laboratory - NREL. Photographic Information eXchange - PIX. Disponível em: <www.nrel.gov>. Acesso em: 15 de Maio de 2010.

[8] IEA-PVPS - International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme. Grid-connected photovoltaic power systems: Survey of inverter and related protection equipments. Task V – Report IEA-PVPS T5-05:2002. Disponível em: <www.iea-pvps.org>. Acesso em: 29 de Dezembro de 2008.

[9] IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Std 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. 1992. Disponível em: <ieeexplore.ieee.org>. Acesso em: 29 de Dezembro de 2008.

[10] PVUPSCALE - PV in Urban Policies – Strategic and Comprehensive Approach for Long-term Expansion. *WP4 – Deliverable 4.1: State-of-the-art on dispersed PV power generation: publications review on the impacts of PV Distributed Generation and Electricity networks*. 2007. Disponível em: <www.pvupscale.org>. Acesso em: 1 de Setembro de 2008.

[11] DUGAN, Roger C.; McGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. *Electrical Power Systems Quality* . Second Edition. Ed. McGraw-Hill: 2004.

[12] PVUPSCALE - PV in Urban Policies – Strategic and Comprehensive Approach for Long-term Expansion. *WP4 – Deliverable 4.2: Utilities experience and perception of PV distributed generation*. 2007. Disponível em: <www.pvupscale.org>. Acesso em: 1 de Setembro de 2008.

[13] IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Std 141-1993: IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*. 1993. Disponível em: <ieeexplore.ieee.org>. Acesso em: 10 de Maio de 2010.

[14] BEBIC, J. *Power System Planning: Emerging Practices Suitable for Evaluating the Impact of High-Penetration Photovoltaics.* National Renewable Energy Laboratory, 2008. Disponível em: <www1.eere.energy.gov/solar/solar_america/rsi.html>. Acesso em: 25 de Janeiro de 2009.

[15] PVUPSCALE - PV in Urban Policies – Strategic and Comprehensive Approach for Long-term Expansion. *WP4 – Deliverable 4.4: Recommendations for Utilities*. 2008. Disponível em: <www.pvupscale.org>. Acesso em: 1 de Setembro de 2008.

[16] McGRANAGHAN, M.; ORTMEYER, T.; CRUDELE, D.; KEY, T.; SMITH, J.; BARKER, P. *Renewable Systems Interconnecyion Study: Advanced Grid Planning and Operations.* Sandia Report SAND2008-0944 P. Sandia National Laboratories, 2008. Disponível em: <www1.eere.energy.gov/solar/solar_america/rsi.html>. Acesso em: 25 de Janeiro de 2009.

[17] EPRI – Electric Power Research Institute. Engineering Guide for Integration of Distributed Generation and Storage into Power Distribution Systems. 2000.

[18] WHITAKER, C.; NEWMILLER, J.; ROPP, M.; NORRIS, B. *Renewable Systems Interconnecyion Study: Distributed Photovoltaic Systems Design and Technology Requirements*. Sandia Report SAND2008-0946 P. Sandia National Laboratories, 2008. Disponível em: <www1.eere.energy.gov/solar/solar_america/rsi.html>. Acesso em: 25 de Janeiro de 2009.

[19] LIU, E.; BEBIC, J. *Distribution System Voltage Performance Analysis for High-Penetration Photovoltaics*. National Renewable Energy Laboratory, 2008. Disponível em: <www1.eere.energy.gov/solar/solar_america/rsi.html>. Acesso em: 25 de Janeiro de 2009.

[20] ORTMEYER, T.; DUGAN, R.; CRUDELE, D.; KEY, T.; BARKER, P. *Renewable Systems Interconnection Study: Utility Models, Analysis, and Simulation Tools*. Sandia Report SAND2008-0945 P. Sandia National Laboratories, 2008. Disponível em: <www1.eere.energy.gov/solar/solar_america/rsi.html>. Acesso em: 25 de Janeiro de 2009.

CAPITULO IV

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: DISCUSSÃO CONCEITUAL E NOVA DEFINIÇÃO

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: DISCUSSÃO CONCEITUAL E NOVA DEFINIÇÃO

Mauro Moura Severino[9]
Ivan Marques de Toledo Camargo[10]
Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira[11]

RESUMO

Os sistemas elétricos convencionais não conseguem garantir o suprimento sustentável de energia elétrica com a abrangência e a qualidade exigidas pela sociedade do século XXI. Esse fato, associado ao enorme avanço tecnológico dos últimos anos, abriu razoável espaço para a expansão da geração distribuída (GD), que tem como seus principais focos o fornecimento de energia elétrica a quem ainda não tem acesso a ela e a redução dos impactos ambientais da geração centralizada convencional. No Brasil, por motivos sociais, ambientais, econômicos, legais e estratégicos, a discussão acerca desse tema é imprescindível. Então, considerando-se que o tema GD é bastante importante, especialmente para o Brasil, controverso e não-consolidado, faz-se necessária uma ampla discussão acerca dele, a começar pelos aspectos conceituais. Este capítulo, reconhecendo essa necessidade, discute, de forma inédita, o conceito de GD e conceitos e aspectos relacionados a ela; propõe novas classificações de aspectos relativos à GD; propõe uma nova definição de GD, mais completa e com mais aplicabilidade que as existentes; e sugere aplicações inovadoras para os resultados apresentados.

Palavras-chave: Geração distribuída, Discussão Conceitual, Definição, Classificações, Índice de Distribuição da Geração.

4.1 INTRODUÇÃO

Conforme já mencionado anteriormente, o mercado a ser ocupado pela geração distribuída (GD) está em expansão, tendo como um dos focos principais e subárea de maior possibilidade de crescimento o fornecimento de energia elétrica a quem ainda não tem acesso a ela. Logo, o crescimento da GD nos próximos anos parece inexorável, conforme indicam o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE, 2007) e Ackermann, Andersson e Söder (2001a).

No Brasil, o tema merece destaque especial pelos seguintes motivos: **a)** nos últimos anos, a qualidade ambiental da matriz energética brasileira piorou bastante; **b)** as mudanças

[9] Universidade de Brasília – UnB/FT/ENE/GSEP – *E-mail*: mauroseverino@ene.unb.br
[10] Universidade de Brasília – UnB/FT/ENE/GSEP – *E-mail*: ivancamargo@unb.br
[11] Universidade de Brasília – UnB/FT/ENE/GSEP – *E-mail*: mago@ene.unb.br

climáticas anunciadas podem comprometer a segurança hídrica necessária à principal fonte de geração de energia elétrica no país; **c)** a insuficiência de água nos reservatórios e de gás natural pode causar desabastecimento de energia elétrica ou, no mínimo, aumentar o risco de que isso ocorra e a insegurança para toda a sociedade, com fortes impactos econômicos; e **d)** o país tem o compromisso legal da universalização do acesso à energia elétrica. Cabe ressaltar que, recentemente, o ministro de Minas e Energia reafirmou o compromisso do governo federal de garantir o acesso à energia elétrica a todos os brasileiros, momento em que atribuiu à energia solar e às pequenas centrais hidrelétricas posição de destaque para a consecução desse objetivo (Secretaria de Comunicação Social da Presidência da República, 2008).

Então, considerando-se que o tema GD é bastante importante, controverso e não-consolidado e que o Brasil tem enorme potencial nessa área, faz-se necessário que ele seja amplamente debatido, a começar por uma profunda discussão conceitual. Este capítulo presta-se a tal propósito, pois discute, de forma inédita, o conceito de GD e conceitos e aspectos relacionados a ela; propõe novas classificações de aspectos relativos à GD; propõe uma nova definição de GD, mais completa e com mais aplicabilidade que as existentes; e sugere aplicações inovadoras para os resultados apresentados.

4.2 CONCEITO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA12

4.2.1 Conceitos, Definições e Classificações Pertinentes

Segundo Houaiss (2001), **conceito** é a "representação mental de um objeto abstrato ou concreto, que se mostra como um instrumento fundamental do pensamento em sua tarefa de identificar, descrever e classificar os diferentes elementos e aspectos da realidade"; a "noção abstrata contida nas palavras de uma língua para designar, de modo generalizado e, de certa forma, estável, as propriedades e características de uma classe de seres, objetos ou entidades abstratas [Um conceito possui: *extensão*, que é o número de elementos da classe em questão (o conceito de 'animal' tem maior extensão do que o de 'vertebrado'); e *compreensão*, que é o conjunto dos caracteres que constituem a definição ('vertebrado', que não inclui todos os animais, tem compreensão mais detalhada do que 'animal').]".

[12] Adaptado do texto de Severino (2008).

Ainda segundo Houaiss (2001), **definição** é a "significação precisa de"; a "indicação do verdadeiro sentido de"; o "enunciado que parafraseia a acepção de uma palavra ou locução pela indicação de suas características genéricas e específicas, de sua finalidade, pela sua inclusão num determinado campo do conhecimento etc."; a "capacidade de descrever (algo, alguém ou a si mesmo) por seus caracteres distintos".

Com base nessas informações, deve-se ressaltar que a pretensão dos parágrafos seguintes é discutir e elaborar o **conceito** de GD, que é a representação mental, o modelo mental, de um objeto abstrato, e, após isso, discutir e elaborar uma **definição** adequada de GD, que pode ser entendida como a representação escrita do conceito de GD. Para a consecução deste objetivo fundamental, é claro que a extensão do conceito deverá ser vista e a compreensão dele deverá ser atingida, as diversas características relativas à GD deverão ser analisadas e, em decorrência disso, as respectivas e adequadas classificações deverão ser consideradas.

Uma vez consolidada a expressão **geração distribuída**, é importante criar-se uma definição que, de fato, transmita adequadamente o entendimento dado a ela neste texto. A geração encontrada nos sistemas elétricos tradicionais — denominada, aqui, de geração centralizada — não é lingüística nem fisicamente o contraposto da geração distribuída: a geração centralizada não é concentrada em um único ponto, nem a geração distribuída está presente em todas as unidades consumidoras de energia elétrica. Sendo assim, parece simples aceitar-se a idéia de que a distribuição da geração não é uma questão de estado, mas, sim, de grau, já que um sistema elétrico tradicional, interligado, nunca terá uma única usina geradora assim como não terá tantos geradores quantas forem as unidades consumidoras. Na realidade, a geração de energia elétrica, mesmo a tradicional, sempre foi distribuída geograficamente, pois, em virtude do grande porte das usinas geradoras, apenas algumas localidades geográficas possuem os requisitos técnicos necessários ao suporte de tais usinas. Considerando o anteriormente exposto, é correto concluir que a geração tradicional, em geral, é constituída por usinas de grande porte que estão distribuídas geograficamente, sendo que a literatura especializada da área não definiu consensualmente o que são usinas de grande porte muito menos qual é o grau de distribuição da geração em determinada região que permite qualificar se a geração é centralizada ou distribuída.

A análise da literatura relevante dessa área de especialidade mostra que as definições existentes para GD não são consistentes e que ainda não há uma definição de GD geralmente aceita, conforme muito bem destacado por Ackermann, Andersson e Söder (2001a), por El-Khattam e Salama (2004) e por Rodrigues (2006).

Para mostrar a diversidade de visões acerca da definição de GD, são mostrados, a seguir, alguns textos que, mesmo não utilizando as expressões **geração distribuída** e *distributed generation*, se não conseguem defini-la adequadamente, colaboram muito para a discussão e a elaboração do conceito de GD a ser utilizado neste trabalho.

1. Um sistema de geração distribuída envolve pequenas quantidades de geração conectadas ao sistema de distribuição com o propósito de alimentação local (nível de subestação) de picos de carga e/ou de tornar desnecessária a construção adicional — ou o reforço — de linhas de distribuição locais (GOOGLE, 2007).

2. Sistemas de energia pequenos, modulares, descentralizados, conectados ou não à rede de energia elétrica e localizados no local onde a energia é consumida ou próximo a ele (US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2007).

3. Geração de eletricidade que ocorre no local do consumo ou próximo a ele ao contrário da maioria da eletricidade que é gerada em local remoto e transportada por longas linhas de transmissão ao consumidor (FUELING THE FUTURE, 2007).

4. Um termo popular para geração de energia *in loco* (KIOCERA SOLAR, 2007).

5. Geração de eletricidade por usinas de pequeno porte localizadas próximas às cargas elétricas que elas suprem. O termo geralmente é usado para se referir a usinas que são pequenas o suficiente para serem conectadas ao sistema de distribuição em vez de ao sistema de transmissão. Dependendo do tamanho das cargas vizinhas e da capacidade da linha de distribuição à qual é conectada, o máximo tamanho da geração distribuída pode variar de uns poucos quilowatts até 5 MW. As menores unidades de GD comercialmente disponíveis hoje podem produzir 30 kW (ALAMEDA POWER & TELECOM, 2007).

6. Geradores de eletricidade (painéis solares, turbinas eólicas, geradores a *biodiesel*, células a combustível etc.) localizados próximos ao ponto de consumo. Enquanto as usinas de geração central continuam a prover energia à rede, os recursos distribuídos ajudam a suprir os picos de demanda e reduzir o carregamento no sistema (INNOVATIVE POWER SYSTEMS, 2007).

7. Geração distribuída é o uso de tecnologias de geração de energia de pequena escala localizadas próximas às cargas alimentadas. Ela permite às indústrias produzirem a sua própria eletricidade a partir de processo de co-geração a gás implementado em suas próprias instalações (GAS MALAYSIA, 2007).

8. Qualquer geração elétrica de pequena escala que está localizada no ponto de uso final ou próximo a ele. Ela pode pertencer e ser operada por um consumidor ou por uma empresa seja ela prestadora de serviço público ou não (POWER BROKERS: ENERGY CONSULTING FIRM, 2007).

9. Fontes independentes de geração de energia que estão localizadas em diversos pontos de uma rede de distribuição (VALUTECH SOLUTIONS, 2007).

10. Pequenas unidades de geração localizadas por todo o sistema elétrico, freqüentemente nas instalações dos consumidores, usadas para dar suporte aos picos de carga ou para reserva de potência (THE INDUSTRIAL ENERGY USERS, 2007).

11. Geração distribuída é um novo método de geração de eletricidade a partir de numerosas fontes pequenas, tais como painéis solares nos telhados das edificações e microturbinas a gás natural localizadas nas edificações residenciais e comerciais, que produzem sobras de calor que podem ser utilizadas para aquecer água ou os ambientes locais. Atualmente, países industriais geram a grande maioria da sua eletricidade em grandes usinas geradoras, que têm excelente economia de escala, mas freqüentemente têm de transmitir eletricidade a grandes distâncias, e a maioria não permite a utilização do calor excedente. A geração distribuída reduz a quantidade de energia perdida na transmissão porque a eletricidade é geralmente gerada próxima ao local em que é utilizada. Isso também reduz o número de linhas de energia a serem construídas (WIKIPEDIA, 2007).

12. GD é uma planta de 20 MW ou menos, situada no centro de carga ou próximo a ele, ou situada ao lado do consumidor, que produz eletricidade no nível de tensão do sistema de distribuição. São quatro as tecnologias apropriadas para a GD: turbinas de combustão, motores recíprocos[13], células a combustível e módulos fotovoltaicos (CALIFORNIA ENERGY COMISSION, 1996).

13. GD é uma fonte de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição ou no lado do consumidor (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a).

14. GD é o termo que se usa para a geração elétrica junto ou próxima do consumidor, com potências normalmente iguais ou inferiores a 30 MW. A GD inclui:

[13] Motores recíprocos são os motores convencionais de combustão interna que utilizam pistões e cilindros, como os utilizados nos veículos automotivos.

cogeradores, geradores de emergência, geradores para operação no horário de ponta, aerogeradores, módulos fotovoltaicos e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) (INEE, 2005).

15. GD é uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor (es), independentemente da potência, da tecnologia e da fonte de energia. As tecnologias de GD têm evoluído para incluir potências cada vez menores. A GD inclui: cogeradores, geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo, geradores de emergência, geradores para operação no horário de ponta, painéis fotovoltaicos e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) (INEE, 2007).

16. GD são tecnologias de geração de pequeno porte, tipicamente inferior a 30 MW, estrategicamente localizadas próximas dos consumidores ou centros de carga, proporcionando benefícios aos consumidores e suporte para a operação econômica das redes de distribuição existentes (GAS RESEARCH INSTITUTE, 1999).

17. GD é uma denominação genérica para diversos tipos de sistemas de geração elétrica de pequeno porte localizada no ponto de consumo final ou próxima deste, é alternativa concreta de suprimento de energia elétrica e de energia térmica aos usuários e configura um modelo complementar ou alternativo ao das grandes centrais de potência no suprimento de energia elétrica (LORA e HADDAD, 2006).

18. GD é definida como o uso integrado ou isolado de recursos modulares de pequeno porte por concessionárias, consumidores e terceiros em aplicações que beneficiam o sistema elétrico e/ou consumidores específicos. O termo tem sinonímia com outras expressões normalmente usadas, como: autogeração, geração *in situ*, co-geração ou geração exclusiva (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE *apud* RODRÍGUEZ, 2002).

19. Compreende todas as instalações de geração que estão conectadas diretamente à rede de distribuição ou do lado do consumidor e que têm base no uso de fontes renováveis de energia ou de tecnologias para geração combinada de calor e energia, não excedendo o tamanho aproximado de 10 MW (5^{th} RESEARCH FRAMEWORK PROGRAMME OF THE EUROPEAN UNION, 2002).

20. Refere-se à geração despachada de forma não-centralizada, usualmente conectada aos sistemas de distribuição e menores que 50–100 MW (REIS, 2003).

21. Todas as unidades de geração com capacidade máxima entre 50 MW e 100 MW que usualmente estão conectadas à rede de distribuição e que não são planejadas nem despachadas de modo centralizado (CIGRE *apud* PURCHALA *et al*., 2006).

22. GD é aquela feita por usinas geradoras que são suficientemente menores que as usinas de geração central a ponto de permitir interconexão em quase qualquer ponto do sistema elétrico (IEEE *apud* PURCHALA *et al*., 2006).

23. GD são unidades gerando energia elétrica na instalação do consumidor ou conectada à rede local de distribuição e suprindo energia diretamente a essa rede (IEA *apud* PURCHALA *et al*., 2006).

Nessas definições-exemplo apresentadas, pode-se ver, com bastante facilidade, que cada autor ou instituição utiliza a definição mais adequada à sua realidade ou aquela que satisfaça a determinadas necessidades. Mesmo grandes e famosas organizações de caráter técnico, como o *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRE), o *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) e a *International Energy Agency* (IEA) divergem substancialmente com relação à definição de GD. Todavia, em vez de essa diversidade de opiniões representarem uma situação de completa falta de entendimento, ela indica a recente evolução conceitual de um tema, a dificuldade de se definir uma tendência razoavelmente nova na indústria, no mercado e nos sistemas re-regulamentados de energia elétrica (ACKERMANN, 2004). Exemplo interessante de evolução conceitual pode ser visto nos exemplos (14) e (15), em que uma mesma instituição apresenta, em momentos diferentes, definições distintas para GD. Cada definição apresentada traz informações importantes acerca de um ponto de vista pelo qual a GD é vista. Com diversas informações disponíveis, é possível construir uma lista de aspectos relevantes a serem discutidos para a elaboração do conceito de GD e para a elaboração de uma definição mais adequada e precisa de GD.

Uma possível lista foi proposta por Ackermann, Andersson e Söder (2001a) e discutida por El-Khattam e Salama (2004), em que estão incluídos os seguintes aspectos, a serem analisados individualmente a seguir: (a) o propósito; (b) a localização; (c) a especificação da potência; (d) a área de entrega da energia gerada; (e) a tecnologia; (f) o impacto ambiental; (g) o modo de operação; (h) a propriedade; e (i) o nível de penetração.

(a) O propósito – Aspecto referido em todas as definições-exemplo, à exceção das definições (2) e (18).

Com relação ao propósito, há relativo consenso entre autores e organizações acerca do propósito da GD, que é prover uma fonte de energia elétrica ativa. Sendo assim, a GD não está obrigada a prover energia reativa[14], como no caso, por exemplo, das células a combustível. Todavia, o termo propósito deve ser melhor investigado, para produzir os resultados esperados neste trabalho.

Não resta nenhuma dúvida de que, ao citarem o propósito da GD como um aspecto relevante, os autores utilizaram o termo com a acepção de intuito, aquilo que se busca alcançar quando se faz alguma coisa, objetivo, finalidade, opções lingüísticas corroboradas por Houaiss (2001) e Ferreira (2004). Porém, este enfoque é apenas correto de um dos três pontos de vista possíveis no caso: o do gerador de GD, o do financiador da GD e o do consumidor da energia gerada pela GD.

O propósito descrito anteriormente é do gerador de GD; portanto, é técnico, porém o do financiador da GD depende de quem ele é. Por exemplo, o propósito pode ser: econômico, no caso de o financiador ser um empresário; político e/ou social, no caso de o financiador ser um órgão governamental; humanitário, no caso de o financiador ser uma agência internacional ou uma organização não-governamental atuante na área. O propósito do consumidor da energia gerada pela GD é, de fato, utilizar essa energia de alguma forma. Importantes segmentos dessa área estão vinculados a esses propósitos: os interessados em co-geração, os autoprodutores e os produtores independentes de energia elétrica (PIEs).

Deve-se, porém, reconhecer que é bastante difícil construir uma classificação adequada considerando-se todos esses propósitos distintos e que, dependendo do caso, um único agente de GD pode concentrar mais de uma das figuras do gerador, do financiador e do consumidor. Desse modo, este trabalho propõe uma classificação mais eficaz que, não desconsiderando o que foi exposto anteriormente, simplifica o entendimento do assunto. O foco dessa classificação não é a geração, a propriedade nem a utilização: é a energia gerada. Sob esse foco, há apenas dois pontos de vista: o da origem e o do destino.

[14] É importante ressaltar que o provimento de potência reativa não deve ser classificado como geração, apesar de, na literatura, isso acontecer, pois é de simples entendimento. Na realidade, as potências ativa e reativa têm naturezas bem distintas: aquela é convertida de uma forma não-elétrica na forma elétrica e vice-versa; esta existe somente na forma elétrica, é inerente ao funcionamento de sistemas elétricos de CA e não é gerada nem consumida, apenas flui entre o gerador e o consumidor de energia ativa. Logo, geradores elétricos, indutores e capacitores não geram nem consomem energia reativa, eles apenas permitem, cada um a seu modo, o intercâmbio dessa energia com a carga, que dela necessita para funcionar.

Para viabilizar essa classificação, é pertinente o uso da analogia deste caso com o de um transformador de dois enrolamentos. Esse equipamento muito conhecido possui dois enrolamentos: o primário, responsável por receber a energia elétrica da fonte de alimentação e transferi-la ao outro enrolamento; e o secundário, responsável por receber a energia transferida pelo primário e fornecê-la à carga elétrica a ele conectada.

Como se pode concluir trata-se de um par de enrolamentos operando em conjunto, cada qual com função definida, de forma que nenhum é mais importante que o outro: são apenas as duas peças inseparáveis de um mesmo par, pois o secundário não receberia energia se não existisse o primário, e o primário não teria razão de ser se não tivesse o secundário para alimentar. No caso da classificação proposta, com foco na energia gerada, estabelecem-se as relações descritas a seguir. O propósito da GD do ponto de vista da origem dela é o seu propósito primário, que é o apresentado anteriormente: gerar energia elétrica ativa. O propósito da GD do ponto de vista do destino dela é o seu propósito secundário, que é bastante variável. Para obtê-lo, é necessário que se responda à seguinte pergunta: a energia elétrica gerada é utilizada com que propósito? É claro que existem muitas respostas a essa simples pergunta que incluem as mostradas a seguir.

1. **Propósito técnico de engenharia** – Têm esse propósito aquelas utilizações que se justificam integralmente pela própria engenharia, como as exemplificadas a seguir: **(a)** Reserva energética para garantir a não-interrupção na operação normal das cargas elétricas no caso de falha na alimentação elétrica convencional: Esse é o caso de sistemas de alimentação ininterrupta, conhecidos como *nobreaks*. Nesses sistemas, a energia suprida pelo sistema elétrico tradicional é fornecida ao *nobreak*, e este alimenta a carga elétrica, formando uma tecnologia conhecida como *online*. De fato, o *nobreak* recebe energia elétrica, condiciona essa energia e a repassa à carga ininterruptamente, sem que haja geração de energia elétrica adicional à que fornece energia à entrada do *nobreak*. Quando ocorre uma falha da alimentação elétrica na entrada do *nobreak*, um banco de baterias adequadamente conectado ao equipamento e devidamente carregado continua a fornecer a energia necessária à alimentação das cargas elétricas, sem interrupção, caracterizando a geração elétrica *in loco*. Nessa situação, deve ser ressaltado que a fonte de GD atua sozinha na alimentação das cargas, apesar de estar conectada à fonte convencional; **(b)** Reserva energética para garantir o rápido

retorno da operação normal das cargas elétricas no caso de falha na alimentação elétrica convencional: Esse é o caso dos tradicionais grupos motores-geradores (GMGs), com motor a combustão interna. Geralmente, esses equipamentos ficam conectados à rede, mas fora de operação. Quando ocorre falha na alimentação elétrica convencional, o motor a combustão parte imediatamente e, após um curto tempo de aquecimento, passa a alimentar todas as cargas elétricas, ou apenas parte delas, caracterizando a geração elétrica de emergência *in loco*. Nessa situação, deve ser ressaltado que a fonte de GD atua sozinha na alimentação das cargas, sem conexão a nenhuma outra fonte de energia elétrica principal, e que a alimentação elétrica das cargas é interrompida até que o GMG restabeleça a alimentação. No retorno da alimentação elétrica convencional, nova transição ocorre, com novo desligamento das cargas; **(c)** Reserva energética para garantir o fornecimento de energia elétrica a determinadas cargas nos períodos de pico de consumo devido à impossibilidade de atendimento pela alimentação elétrica convencional: Esse é o caso em que a fonte de alimentação convencional consegue fornecer a energia solicitada pela carga durante boa parte do tempo, mas não consegue fazê-lo nos períodos de pico de consumo. Nesses períodos, a fonte de caráter complementar é acionada para garantir a alimentação que não pôde ser suprida pela fonte convencional, caracterizando a geração elétrica *in loco*. Nessa situação, deve ser ressaltado que a fonte de GD pode atuar sozinha na alimentação das cargas, sem conexão a nenhuma outra fonte de energia elétrica, ou pode alimentar as cargas estando conectada à rede elétrica existente; **(d)** Armazenamento de energia em forma elétrica ou não-elétrica para posterior uso na forma de energia elétrica: Esse é o caso, por exemplo, do uso da energia gerada por painéis fotovoltaicos para o carregamento de baterias que, por sua vez, fornecerão energia elétrica às cargas nos momentos em que os painéis fotovoltaicos não puderem operar por falta de radiação solar. Nesse caso, o uso da energia armazenada na forma elétrica caracteriza a geração *in loco*. Outro exemplo que pode ser citado é o do uso da energia elétrica proveniente de alguma fonte elétrica, convencional ou não, para realizar a eletrólise da água. Um dos produtos da hidrólise, o gás hidrogênio, é devidamente armazenado e, posteriormente, utilizado para gerar energia elétrica em alguma fonte que o utilize como combustível, tais como a célula a combustível e o motor a combustão. Como se pode concluir, essa utilização pode ser de caráter exclusivamente técnico, justificando-se, portanto, integralmente pela própria engenharia, caso a energia gerada a partir desse armazenamento seja utilizada exclusivamente com finalidade técnica, ou pode apresentar caráter de outras naturezas, que serão discutidas a seguir.

2. Propósito econômico – Têm esse propósito aquelas utilizações que se justificam integralmente por motivos econômicos, como as exemplificadas a seguir: **(a)** Reserva energética para garantir o fornecimento de energia elétrica a todas as cargas elétricas de uma instalação, ou apenas a parte delas, nos horários em que a energia fornecida pela fonte convencional for mais cara: Em muitas situações, o custo da energia elétrica varia de acordo com a curva de demanda de carga e com a correspondente geração disponível simultaneamente. Então, fontes de GD podem ser utilizadas, caracterizando a geração *in loco*, para suprir todas as cargas de uma instalação, ou apenas parte delas, em determinados períodos. Com isso, haveria redução de gastos com eletricidade para o consumidor. Nessa situação, deve ser ressaltado que a fonte de GD pode atuar sozinha na alimentação das cargas, sem conexão a nenhuma outra fonte de energia elétrica, ou pode alimentar as cargas estando conectada à rede elétrica existente; **(b)** Suporte energético ao sistema elétrico para prover parte da energia requerida pelas cargas e para melhorar o desempenho do sistema: Nesse caso, a fonte de GD atua todo o tempo, ou grande parte dele, conectada ao sistema elétrico existente, dando-lhe suporte para a melhoria do desempenho em aspectos como a qualidade do perfil de tensão, as perdas de energia e a qualidade da energia. Como se pode concluir, além de poder ser de caráter exclusivamente técnico, caso vise apenas à questão técnica, essa utilização pode ser de caráter exclusivamente econômico, caso vise ao ajuste de algum parâmetro de desempenho técnico com a finalidade de melhorar algum índice econômico.

3. Propósito ambiental – Têm esse propósito aquelas utilizações que se justificam integralmente por motivos ambientais, como é o caso, por exemplo, da substituição de geração poluente de energia elétrica com o objetivo de reduzir ou eliminar a poluição ambiental. Considerando que esse propósito pode possuir graus, propõe-se aqui que o propósito ambiental seja classificado em propósito de baixo impacto, médio impacto e alto impacto.

4. Propósito social – Têm esse propósito aquelas utilizações que se justificam integralmente por motivos sociais, como é o caso, por exemplo, da alimentação de cargas elétricas para as quais não há a possibilidade de alimentação por meio de outra fonte de energia elétrica, especialmente por rede elétrica convencional: Esse é o caso da alimentação elétrica de instalações isoladas, ou seja, não-atendidas por nenhuma rede elétrica

convencional. As instalações aqui referidas podem localizar-se: em área próxima a uma rede elétrica convencional, mas com obstáculos geográficos que tornam a conexão a essa rede demasiadamente cara; em área remota[15], ou seja, muito distante das redes elétricas convencionais, o que torna a conexão com alguma dessas redes também muito cara; em área de proteção ambiental permanente garantida por lei, o que torna impossível a conexão a uma rede elétrica convencional, mesmo que próxima, em razão da ilegalidade da construção de linha elétrica.

As utilizações que têm propósito social são de difícil classificação, haja vista a enorme quantidade de possibilidades distintas e a subjetividade na análise de cada uma delas. Mesmo reconhecendo essa dificuldade, apresenta-se, neste trabalho, uma proposta de classificação dessas possíveis utilizações ainda com foco no propósito, agora mais específico. Para obtê-la, é necessário que se responda à seguinte nova pergunta: para que as pessoas que vivem em locais não-atendidos por uma rede elétrica convencional utilizam a energia elétrica gerada? É claro que, também neste caso, existem muitas respostas a essa simples pergunta, que incluem as mostradas a seguir.

(I) Alimentação de cargas elétricas de iluminação e pequenos equipamentos eletrodomésticos: Nesse caso, a energia produz uma pequena melhoria na qualidade de vida dos usuários. A iluminação, entre outras coisas, aumenta a segurança e o conforto noturnos e viabiliza lazer e informação por meio da leitura noturna. A utilização de pequenos equipamentos eletrodomésticos viabiliza, por exemplo: lazer e acesso a informação por meio do uso de televisão e/ou de rádio; maior conforto térmico, por meio do uso de ventilador; e maior salubridade ambiental, por meio do uso de repelentes eletroeletrônicos de insetos. A energia, geralmente de pequeno porte, envolvida com essa utilização caracteriza um propósito de **baixo impacto**.

(II) Alimentação das cargas elétricas citadas no item (a) adicionadas a pequenos sistemas de comunicação, pequenas cargas elétricas de aquecimento e refrigeração e pequenos motores: Nesse caso, a energia produz uma melhoria na qualidade de vida dos usuários bastante superior à do caso anterior, pois, com comunicação, aquecimento, refrigeração e motorização, algumas atividades tornam-se viáveis, melhorando as condições de segurança,

[15] Faz-se, aqui, a devida distinção entre os termos **isolada** e **remota**. No contexto deste trabalho, o primeiro refere-se à não-conexão a uma rede elétrica convencional; o segundo refere-se à grande distância espacial, geográfica, a uma rede elétrica convencional, causa para a não-conexão a ela. Sendo assim, neste trabalho, toda instalação remota é isolada, mas nem toda instalação isolada é remota.

higiene, saúde e alimentação. Com comunicação, por exemplo, a população local tem informações externas mais rapidamente e pode solicitar auxílio externo tempestivamente em casos emergenciais, como os de doença ou de acidentes naturais. Com refrigeração, obtida por meio do emprego de geladeiras e congeladores, há a possibilidade relevante de armazenamento de medicamentos e de alimentos por tempos mais longos, fatores essenciais de preservação da saúde das pessoas. Com aquecimento elétrico, neste caso resultado da utilização de forno de microondas e de pequenas cargas resistivas, é possível, por exemplo, o descongelamento rápido de alimentos em ocasiões em que não há como produzir fogo pela combustão de lenha ou de gás liquefeito de petróleo (GLP). Considerando-se potências um pouco maiores que a consumida por um aparelho de microondas, é possível a utilização da energia elétrica para aquecimento ambiental interno em locais muito frios, como sistema de aquecimento reserva ao tradicional a lenha ou a gás. Por sua vez, a utilização de pequenos motores permite melhor gerenciamento de água, por meio do acionamento de bombas d'água, fato que favorece muito a salubridade no local. A energia envolvida com essa utilização caracteriza um propósito de **médio impacto**.

(III) Alimentação das cargas elétricas citadas nos itens (I) e (II), com a seguinte distinção: essa alimentação sustenta atividade econômica de subsistência – Esse é o caso em que, por exemplo, uma atividade de pesca artesanal já existente pode ser incrementada com o uso do congelamento do pescado para futura venda. Com isso, uma atividade de sobrevivência pode se transformar em uma atividade econômica de subsistência, melhorando substancialmente a qualidade de vida da população envolvida e aumentando a probabilidade de que as pessoas dessa população não abandonem o local de origem para se encaminharem às cidades em busca de melhores condições de vida. A energia envolvida com essa utilização caracteriza um propósito de **alto impacto**.

(IV) Alimentação das cargas elétricas citadas nos itens (I), (II) e (III), com a seguinte distinção: essa alimentação sustenta atividade econômica de desenvolvimento, mais expressiva, portanto, que a de subsistência – Esse é o caso em que, por exemplo, uma atividade de comercialização de pescado congelado já existente pode ser incrementada com a agregação de valor a esse produto, inexistente até então, por meio da limpeza e do corte do filé do pescado. Com isso, o produto deixa de ser o peixe congelado e passa a ser o filé congelado do peixe, pronto para o consumo. Com isso, uma atividade econômica de subsistência pode se transformar em uma atividade econômica de desenvolvimento, melhorando substancialmente a qualidade de vida da população envolvida, aumentando

bastante a probabilidade de que as pessoas dessa população não abandonem o local de origem para se encaminharem às cidades em busca de melhores condições de vida e criando a real probabilidade de que pessoas sejam atraídas a viver nesse local em razão da significativa melhoria das condições de vida. A energia envolvida com essa utilização caracteriza um propósito de **altíssimo impacto**.

Em cada projeto de GD, essas possíveis utilizações da energia gerada podem ocorrer sozinhas ou associadas de diversas formas, criando uma complexidade bastante grande para viabilizar uma análise detalhada de todas as situações possíveis. Então, neste trabalho, foi feita a opção de se utilizar a classificação proposta acima em combinação com outras que serão ainda desenvolvidas em vez de se aprofundar, neste ponto, a análise desta classificação. A figura 01, a seguir, sintetiza aqui proposta classificação de GD quanto ao propósito, com foco no propósito secundário — o destino, a utilização da energia elétrica gerada.

Sob esse ponto de vista, essa classificação não é relevante para a definição de GD, mas é extremamente importante para a análise quanto à finalidade de um empreendimento de geração elétrica.

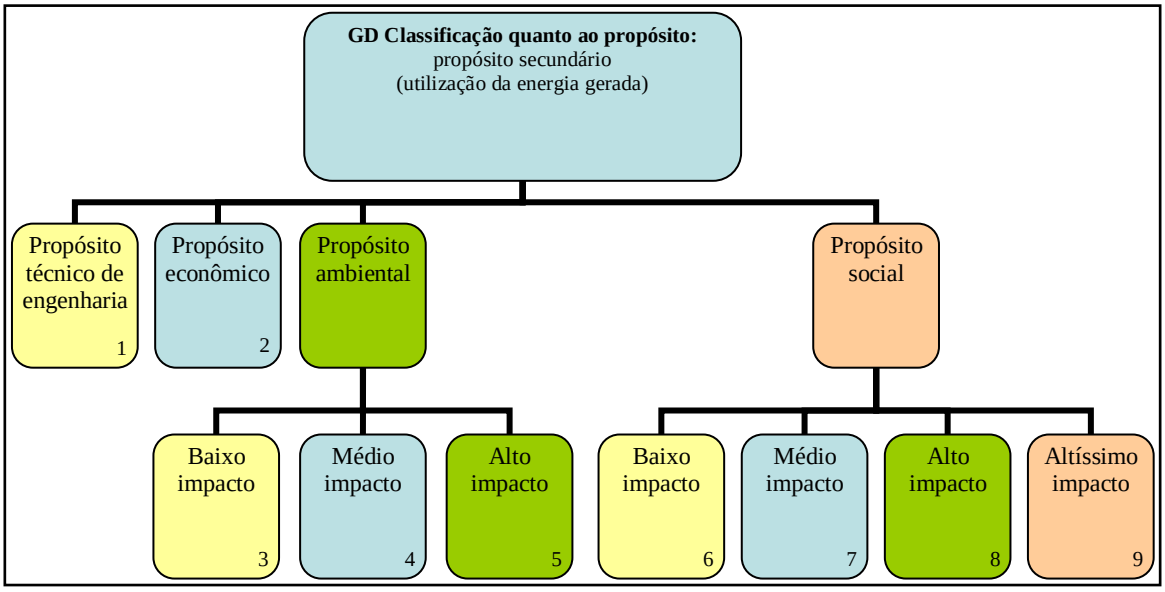


Figura 01: Classificação de GD quanto ao propósito. (b) A localização – Aspecto referido em todas as definições-exemplo.

A definição de localização da GD varia entre diferentes autores. A maioria deles define a localização da GD no lado da rede de distribuição, alguns autores também a incluem no lado

do consumidor e alguns a incluem até mesmo na rede de transmissão. Para Ackermann, Andersson e Söder (2001a), com a posição ratificadora de El-Khattam e Salama (2004), a localização da GD é definida como a instalação e a operação das unidades geradoras de energia elétrica conectadas diretamente à rede de distribuição ou conectadas à rede no lado do consumidor. Essa definição é utilizada por eles sob o argumento de que a conexão das unidades geradoras à rede de transmissão é feita tradicionalmente pela indústria. Contudo, a idéia central da GD é localizar a geração próxima à carga, daí a localização dar-se na rede de distribuição ou no lado do consumidor.

Na hipótese de se considerar que a GD é geração de energia elétrica no nível da distribuição ou do consumidor, a definição requer uma distinção mais detalhada entre um sistema de transmissão e um de distribuição. A distinção com base no nível de tensão não pode ser considerada útil porque algumas linhas de distribuição operam com tensão superior à tensão de operação de algumas linhas de transmissão (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a). Ademais, o nível de tensão não permite nenhuma distinção internacionalmente útil entre transmissão e distribuição, o que remete a outra abordagem: a definição legal. No contexto do mercado competitivo de eletricidade, apenas a definição legal para sistemas de transmissão e de distribuição provê a clara distinção entre ambos (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a). Nos países sem uma clara definição legal, contudo, discussões adicionais são requeridas.

Com base nessa definição de localização da GD, outra questão torna-se evidente: como classificar uma unidade geradora de pequeno porte, como, por exemplo, uma fazenda eólica ou um sistema de geração combinada de calor e energia — da língua inglesa *combined heat and power* (CHP), conectada à rede de transmissão? Teoricamente, as duas seguintes situações podem ocorrer (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a): **(a)** O sistema CHP está localizado em uma grande indústria, e o consumidor industrial está diretamente conectado à rede de transmissão. Neste caso, o sistema CHP poderia ser descrito como GD, pois ele está conectado no lado do consumidor; **(b)** A fazenda eólica de médio porte está diretamente conectada ao sistema de transmissão, devido ao limite de capacidade da rede de distribuição local. Neste caso, a fazenda eólica não poderia ser descrita como GD.

Como se pode observar, a localização da GD é o único aspecto contemplado em todas as definições-exemplo de GD apresentadas. Ademais, os exemplos trazidos pela literatura mostram a dificuldade da aplicação prática dessa definição em certos casos reais ou fictícios, mas plausíveis. Com isso, é correto concluir que a definição de localização da GD, seja de base técnica ou legal, é aspecto de extrema relevância, pois, independentemente da potência nominal das usinas de GD e de qualquer outro aspecto, ela tem, como nenhum dos outros aspectos citados tem, caráter decisório na classificação de uma usina geradora como GD ou não.

O seguinte exemplo ilustra bem esse fato: Uma cidade de porte médio, que está em processo de crescimento econômico acelerado, é alimentada por uma única linha de transmissão e está localizada no final dela. Essa linha integra um sistema de transmissão e opera com capacidade máxima de transmissão. Para sustentar o aumento da carga, construiu-se uma fazenda eólica de médio porte, instalada em local ideal à tecnologia de geração e conectada diretamente à linha de transmissão. Se vigorar a idéia apresentada de que uma fonte somente é considerada GD se estiver conectada a uma rede de distribuição, essa fazenda eólica não seria classificada como GD, apesar de ser situação considerada por muitos autores como típica de GD. Cabe ressaltar que o art. 14 do Decreto n.° 5.163/2004 é a primeira norma legal brasileira a definir GD, e o faz restringindo a sua conexão aos sistemas de distribuição (BRASIL, 2004).

Sabendo serem bem distintas as realidades dos Estados Unidos da América (EUA), dos países europeus e do Brasil, é bastante razoável considerar-se que, no Brasil, país em desenvolvimento com grande extensão territorial e enorme necessidade de desenvolver sua economia, a probabilidade de ocorrência de casos como o citado no exemplo anterior é muito mais alta que nos EUA — país de grande extensão territorial, mas com distribuição populacional mais uniforme no território e matriz de geração elétrica mais diversificada e menos concentrada — e que na maioria dos países europeus — com pequena extensão territorial e distribuição populacional e de consumo de energia elétrica muito mais uniforme no território.

Com base nesse aspecto relevante da realidade brasileira, neste trabalho, a definição de localização da GD será ampliada com relação à anterior, para abranger também os casos em que a usina geradora esteja diretamente conectada ao sistema de transmissão. Desse modo,

elimina-se a discussão relativa às controversas definições técnicas e legais de sistema de transmissão e de sistema de distribuição.

Outra situação relevante da realidade brasileira que precisa ser contemplada pela definição de localização da GD é a relativa às comunidades isoladas existentes em vários locais do país, especialmente na região amazônica, objeto de estudo deste trabalho. Essas comunidades, entendidas aqui no sentido mais amplo do termo, são pequenas populações que vivem em locais eletricamente isolados, ou seja, que não usufruem dos benefícios resultantes dos serviços oferecidos por uma rede elétrica convencional. Dessa forma, tanto uma tribo indígena quanto um grupo de cientistas e seus auxiliares vivendo nessas condições são considerados formadores de comunidades isoladas.

Com uma definição mais abrangente de localização da GD, diversos projetos típicos de GD, particularmente os de maior interesse para a realidade brasileira, passam a ter maior probabilidade de serem classificados como tal, pois o ônus de classificar, ou não, uma usina de geração como GD com base apenas na localização é deixado a cargo exclusivo da legislação aplicável a cada situação. No caso brasileiro, talvez esse apoio técnico possa aumentar o estímulo legal à implementação de projetos de GD, tendo em vista que ele amplia a visão estabelecida no Decreto n.° 5.163/2004 (BRASIL, 2004). A figura 02 sintetiza a proposta de classificação de GD quanto à localização feita aqui.

Quanto a esse atributo da GD, há enormes diferenças nas definições encontradas na literatura. Ackermann, Andersson e Söder (2001a) apresentam os seguintes exemplos: **(a)** para o *Electric Power Research Institute* (EPRI): de uns poucos quilowatts até 50 MW; **(b)** para o *Gas Research Institute*, de Chicago – EUA: tipicamente de 25 kW a 25 MW; **(c)** para o CIGRE: inferior a 50 – 100 MW; (d) para outros autores: de poucos quilowatts até 100 MW ou de 500 kW a 1 MW. Para Willis e Scott (2000), a potência da GD está geralmente na faixa de 15 kW a 10 MW.

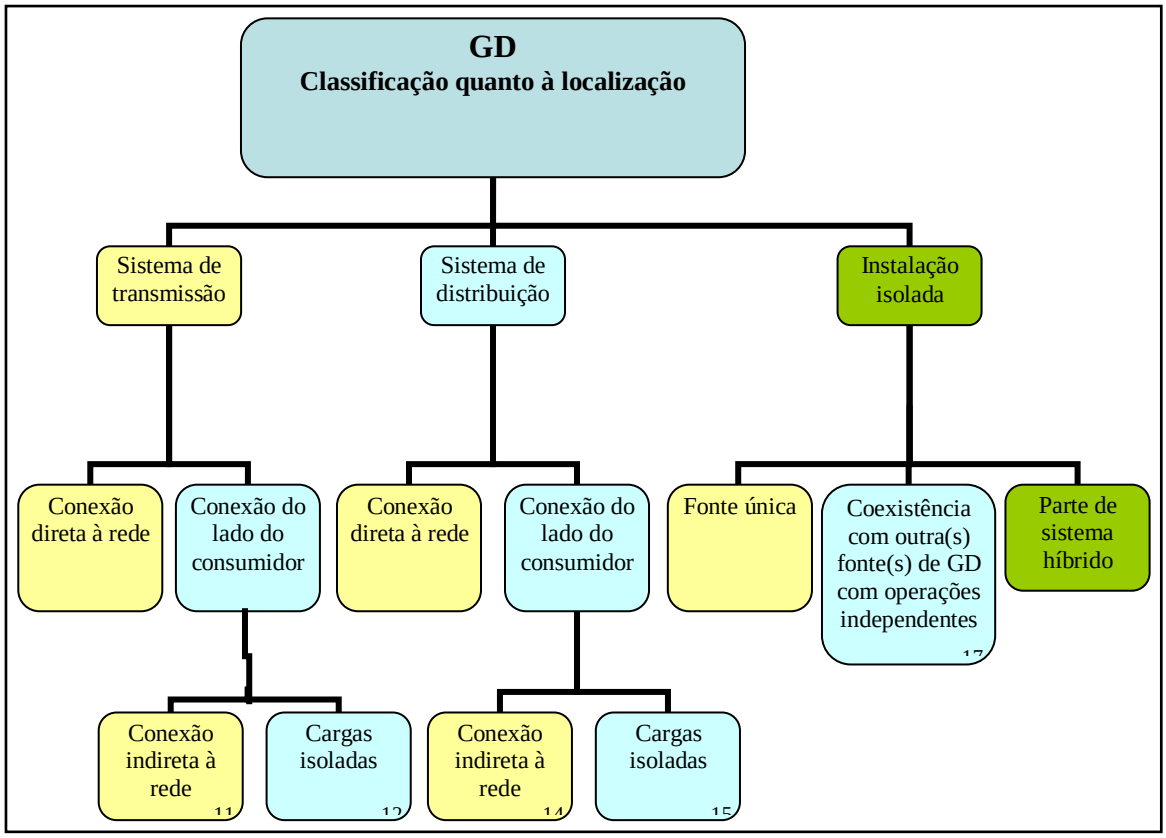


Figura 02: Classificação de GD quanto à Lcalização. (c) A especificação da Potência – Aspect referido em todas as definições-exemplo, à exceção das definições (3), (4), (6), (9), (13) e (23)

Em virtude das diferentes regulamentações governamentais, a definição para a potência da GD também varia de um país para outro, conforme mostram os exemplos a seguir (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a; EL-KHATTAM e SALAMA, 2004):

1. A legislação sueca dá tratamento especial a pequenas gerações com capacidade de até 1,5 MW. Daí, na Suécia, GD é definida freqüentemente como geração de até 1,5 MW. Porém, para a lei sueca, uma fazenda eólica de 1.500 MW, com 1.000 turbinas eólicas de 1,5 MW cada uma, ainda é considerada GD, em razão da potência unitária de cada turbina, e não da potência total da fazenda eólica. Já para as usinas hidrelétricas, em comparação, é a potência total da usina é que é relevante, e não a potência unitária de cada gerador. Sendo assim, uma usina hidrelétrica com potência total de 1.500 MW não é considerada GD.

2. Nos mercados inglês e galês, usinas de GD com capacidade inferior a 100 MW não são despachadas de forma centralizada e, se a capacidade é inferior a 50 MW, a potência gerada não necessita ser negociada por meio do mercado atacadista. Por essa razão, o termo

GD é, predominantemente, usado para unidades geradoras com capacidade inferior a 100 MW.

Adicionalmente, a máxima potência que pode ser conectada a um sistema de distribuição depende da capacidade deste, que é vinculada ao nível de tensão nominal dele. Uma vez que cada sistema de distribuição tem projeto técnico único, em razão das diversas peculiaridades dele, nenhuma definição de máxima capacidade de geração que pode ser conectada a um sistema de distribuição pode ser dada. Conforme citado por Ackermann, Andersson e Söder (2001a) há literatura sugerindo que unidades geradoras com potências superiores a 100 MW – 150 MW não podem ser conectadas a linhas elétricas de 110 kV devido a restrições técnicas. Considerando que a tensão de 110 kV é, na maioria dos casos[16], o máximo nível de tensão de linhas pertencentes e operadas por companhias de distribuição, a máxima capacidade para usinas de GD parece estar na faixa de 100 MW a 150 MW.

Todavia, segundo Ackermann, Andersson e Söder (2001a), em Berlim, Alemanha, a empresa de serviços públicos de eletricidade *BEWAG* construiu uma usina geradora de energia no centro da cidade para produzir 300 MW de energia e 300 MW de calor. A empresa supre os consumidores por meio de várias linhas de distribuição de 110 kV e de 33 kV, de propriedade dela e por ela operados. A energia elétrica e o calor gerados são consumidos localmente. Em razão disso, considera-se essa usina um caso de GD, para qualquer uma das duas definições de localização apresentadas no aspecto anterior. Não obstante o fato de este caso ser muito especial, ele mostra claramente que a potência de GD pode variar entre uns poucos quilowatts até 300 MW.

Essa possibilidade de larga variação de potência traz consigo um problema a ser enfrentado: os aspectos técnicos relacionados à GD variam substancialmente com a variação da potência. Desse modo, é apropriado, para muitas aplicações, o estabelecimento de categorias de potência de GD. Ackermann, Andersson e Söder (2001a) propõem a seguinte classificação, seguida por El-Khattam e Salama (2004):

- Micro GD – de aproximadamente 1 W a 5 kW;
- Pequena GD – de 5 kW a 5 MW;

[16] No Brasil, há concessionárias de distribuição de energia elétrica que utilizam tensões superiores a 110 kV. A Companhia Energética de Brasília (CEB), por exemplo, possui diversas linhas de distribuição de 138 kV alimentando subestações abaixadoras em áreas urbanas.

- Média GD – de 5 MW a 50 MW;
- Grande GD – de 50 MW a aproximadamente 300 MW.

Para Lora e Haddad (2006), essa classificação, feita com base na realidade dos EUA e da Europa, não é integralmente adequada ao Brasil, pois, dependendo do autor brasileiro, a GD é geralmente limitada a potências instaladas que variam de 30 MW a 50 MW. Assim, mesmo utilizando a nomenclatura anterior, sugerem a seguinte classificação:

- Micro GD – até 10 kW;
- Pequena GD – de 10 kW a 500 kW;
- Média GD – de 500 kW a 5 MW;
- Grande GD – de 5 MW a 100 MW.

O quadro 01 apresenta três propostas de categorias: a proposta de Ackermann, Andersson e Söder (2001a), a de Lora e Haddad (2006) e a deste trabalho, uma adaptação dessas duas classificações para flexibilizar o limite máximo de 30 MW definido pelo Decreto n.° 5.163/2004 (BRASIL, 2004) para a GD. Para Willis e Scott (2000), a expressão *dispersed generation* — em língua portuguesa, geração dispersa — designa um caso particular de GD, com potências na faixa de 10 kW a 250 kW. Para outros autores, a faixa correspondente à geração dispersa é de 1 kW a 1 MW (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a).

Quadro 01: Categorias de Potência de GD.

Referência bibliográfica	Micro GD	Pequena GD	Média GD	Grande GD
Ackermann, Andersson e Söder (2001a)	< 5 kW	5 kW a 5 MW	5 MW a 50 MW	50 MW a 300 MW
Lora e Haddad (2006)	< 10 kW	10 kW a 500 kW	500 kW a 5 MW	5 MW a 100 MW
Este trabalho	< 10 kW	10 kW a 500 kW	500 kW a 30 MW	> 30 MW

Considerando todas essas informações, neste trabalho será feita a mesma consideração feita por Ackermann, Andersson e Söder (2001a) e por El-Khattam e Salama (2004): a especificação da potência da usina geradora não é relevante para a definição de GD. Porém, adota-se, aqui, a classificação apresentada no quadro 01 e sintetizada na figura 03.

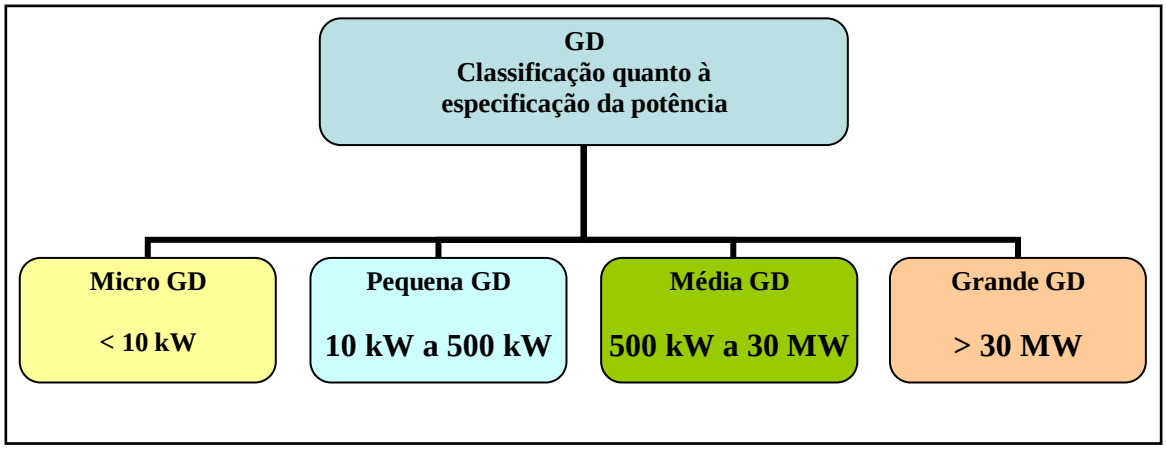


Figura 03: Classificação de GD quanto à Especificação da Potência. (d) A área de entrega da energia gerada – Aspecto referido apenas nas definições-exemplo (1), (2),

Para alguns autores, a energia gerada pela GD deve ser consumida no sistema de distribuição em que a GD está instalada. Essa consideração é, na realidade, uma definição da área da entrega da energia gerada, com a prevalência, aqui, da primeira definição apresentada anteriormente de localização da GD. Porém, em certas circunstâncias, conforme expõem Ackermann, Andersson e Söder (2001a) e El-Khattam e Salama (2004), definir a área de entrega de energia não é muito útil. Isso pode ser visto no exemplo a seguir: A empresa *Wairarapa Electricity*, da Nova Zelândia, opera uma fazenda eólica conectada a uma de suas redes de distribuição, sendo que essa fazenda pertence à outra empresa de eletricidade. A energia produzida por ela é quase totalmente consumida na própria rede de distribuição. Todavia, em noites de ventos de alta velocidade e baixo consumo de eletricidade, a fazenda eólica realmente exporta energia elétrica para o sistema de transmissão. Com isso, o consumo da energia gerada ocorre fora da rede de distribuição.

Conforme se pode concluir, a definição da área de entrega de energia restrita ao sistema de distribuição desqualifica esse projeto como GD, não obstante o fato de ele ser, para muitos autores, um típico projeto de GD. Adicionalmente, qualquer restrição relativa à área de entrega de energia na definição de GD poderá resultar em complexas análises do fluxo de potência na rede de distribuição (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a). É interessante registrar que a expressão *embedded generation*, muitas vezes utilizada como sinônima de *distributed generation*, é bastante apropriada para descrever o caso em que a energia gerada pela GD é totalmente consumida localmente. Entretanto, como já analisado anteriormente, essa sinonímia não se aplica genericamente.

Considerando essas informações, neste trabalho, a área de entrega de energia não será considerada relevante para a definição de GD. Contudo, adota-se aqui a classificação sintetizada na figura 04.

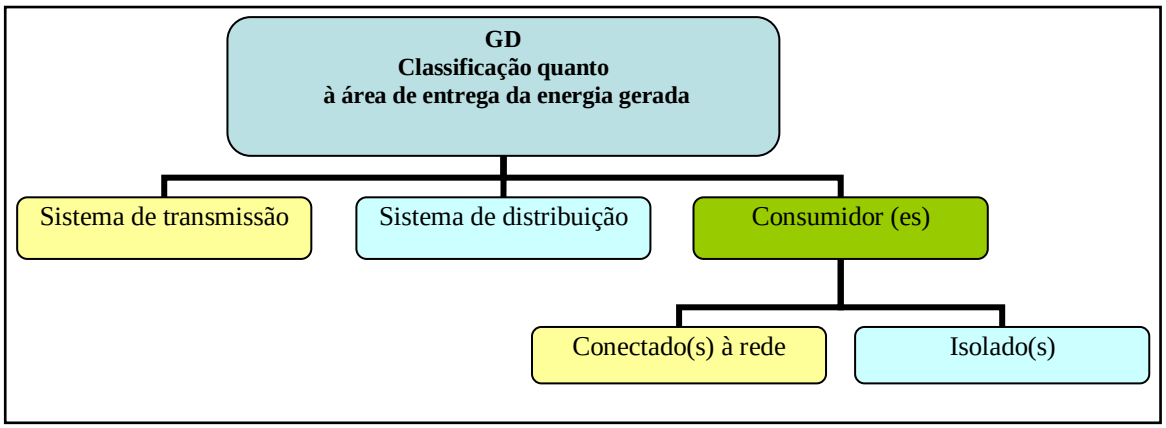


Figura 04: Classificação de GD quanto à Área de Entrega da Energia Gerada. (e) A tecnologia – Aspecto referido apenas nas definições-exemplo (6), (7), (11), (12), (14),

Conforme mostrado nas definições-exemplo, a expressão GD é utilizada em combinação com certas categorias de tecnologia de geração, como, por exemplo, painéis fotovoltaicos, aerogeradores e co-geração. Na literatura, encontram-se outros exemplos, como tecnologia de energia renovável e fontes alternativas. É fato que existem diversas tecnologias disponíveis atualmente para a GD diferentes entre si, conforme pode ser visto no quadro 02. Porém, a descrição técnica detalhada e a análise do estado-da-arte para cada uma das dessas tecnologias não estão no escopo deste trabalho. Aqui, apenas serão discutidos três aspectos dessas tecnologias considerados importantes para classificá-las.

No quadro 02, as siglas vinculadas a células a combustível designam tecnologias diferentes desse equipamento, descritas em Severino (2008). Primeiramente, na literatura especializada da área, é observado que, muitas vezes, os conceitos de GD, de fontes renováveis de energia e de fontes alternativas de energia são confundidos e, às vezes, até mesmo tidos por sinônimos, conforme identifica Rodrigues (2006), que propõe como forma de resolver essas dúvidas, algumas definições adequadas ao seu próprio contexto:

- Fontes alternativas de energia: são fontes de energia relativamente novas (no que se refere à exploração como fontes de energia elétrica), não-utilizadas tradicionalmente e que

não produzem energia em grande escala, tais como, solar, eólica, células a combustível e biomassa.

- Fontes renováveis de energia: são aquelas que não queimam combustível fóssil para a produção de energia elétrica, não causando, assim, um grande dano ambiental, tais como hídrica (produção de energia em hidrelétricas), solar e eólica.

Quadro 02: Tecnologias para GD.

Tecnologia	Capacidade típica disponível por módulo
Não-renováveis	
Turbina a gás de ciclo combinado	35 MW – 400 MW
Motores a combustão interna	5 kW – 10 MW
Turbina a combustão	1 MW – 250 MW
Microturbina	35 kW – 1 MW
Renováveis	
Pequena hidrelétrica	1 MW – 100 MW
Micro-hidrelétrica	25 kW – 1 MW
Turbina eólica	200 W – 3 MW
Arranjo fotovoltaico	20 W – 100 kW
Térmica-solar	1 MW – 80 MW
Biomassa (exemplo: gaseificação)	100 kW – 20 MW
Célula a combustível: PAFC	200 kW – 2 MW
Célula a combustível: MCFC	250 kW – 2 MW
Célula a combustível: PEMFC	1 kW – 250 kW
Célula a combustível: SOFC	250 kW – 5 MW
Geotérmica	5 MW – 100 MW
Energia dos oceanos	100 kW – 1 MW
Motor *stirling*	2 kW – 10 kW
Bateria	500 kW – 5 MW

Fonte: ACKERMANN *et al.*, 2001b. (modificado).

A definição de fontes alternativas apresentada reforça a idéia de fonte de energia relativamente nova, tradicionalmente não-utilizada, pois, de fato, o que pretende ser alternativo, deve se oferecer como possibilidade de escolha, deve ser capaz de funcionar como outra solução a um problema existente, deve representar uma opção fora das idéias convencionais, deve se propor em substituição ao sistema estabelecido (HOUAISS, 2001). Então, as fontes alternativas de energia são fontes diferentes das convencionais; logo, não são tradicionalmente utilizadas, sendo, portanto, relativamente novas. Pelo fato de que a disponibilidade dos diferentes recursos energéticos varia significativamente entre regiões e países, o que é convencional para uma localidade não é para outra. Dessa forma, uma definição genérica para fontes alternativas de energia é possível, mas há de se ressaltar que a aplicação prática dela em localidades diferentes pode levar a conclusões distintas: uma fonte pode ser convencional para um país e alternativa para outro.

Bem registra Romagnoli (2005) o entendimento de que o uso da expressão **fontes alternativas** pode levar à interpretação de que essas fontes são de caráter secundário, de menor importância. Porém, deve ser registrado que essa expressão inclui fontes clássicas e, algumas vezes, extremamente competitivas como as PCHs e fontes com enorme potencial de crescimento, como as usinas de geração a biomassa sucroalcooleiras. Esse autor justifica o preconceito atual em relação à GD no Brasil e no mundo com base na herança de sistemas fortemente regulados e com base na geração centralizada. Considerando-se a possibilidade aqui destacada, ressalta-se neste trabalho que, no entendimento do que seja fonte alternativa, não há espaço para o preconceito nem para a subestimação do potencial e das qualidades dessas fontes, conforme se verifica no restante deste texto.

Finalmente, a definição de fontes alternativas apresentada restringe o foco sobre a produção em pequena escala, considerando, provavelmente, que as grandes fontes energéticas de determinada localidade são as convencionais. Todavia, para tornar o conceito de fontes alternativas de energia mais abrangente, a questão relativa à escala será desconsiderada neste trabalho, deixando aberta a possibilidade de que as fontes alternativas tornem-se mais efetivas na geração elétrica que as fontes convencionais. Toda essa análise remete para a seguinte proposta de definição (SEVERINO, 2008):

> Uma fonte alternativa de energia é aquela cuja utilização para a geração de energia elétrica é relativamente nova na respectiva área geográfica, não sendo, portanto, utilizada tradicionalmente com essa finalidade e, por isso, não contribuindo ou contribuindo de forma minoritária para a correspondente matriz de geração de energia elétrica.

A definição de fontes renováveis de energia apresentada traz a idéia de processo de geração de energia elétrica que não queima combustível fóssil e, assim, não causa grande dano ambiental. De fato, o combustível fóssil é considerado recurso não-renovável, e a queima dele causa dano ambiental. Não obstante, o aspecto relevante aqui não é o grau poluidor que tem a fonte, mas sim a fonte primária de energia — aquela cuja energia na forma não-elétrica é convertida para a forma elétrica —, pois há fontes renováveis que causam grandes e nocivos impactos ambientais. Caso a fonte primária de energia seja renovável, a geração de energia elétrica a ela associada é denominada renovável.

Segundo a IEA, recursos de energia renovável são definidos como recursos que geralmente não estão sujeitos ao esgotamento, tais como o calor e a luz solares, a força do vento, a

biomassa, a queda d'água, a energia dos oceanos e o aquecimento (IEA, 1997). Conforme citado em Ackermann, Andersson e Söder (2001a), a energia que chega a Terra é aproximadamente 1.000 vezes maior que a energia consumida na queima de combustível fóssil no mesmo intervalo de tempo. Com isso, é correto descrever os recursos renováveis como abundantes, apesar de a distribuição dos recursos energéticos pelas diversas regiões do planeta ser bastante desigual.

Há de se observar que as duas definições citadas anteriormente tratam de fonte de energia, mas sob focos distintos. A definição apresentada para fontes alternativas de energia trata da fonte primária de energia, a partir da qual ocorrerá a geração elétrica; por sua vez, a definição apresentada para fontes renováveis de energia trata, indevidamente, da fonte de energia elétrica, que utiliza determinado processo de geração. Como se vê, as duas definições não foram construídas com base na mesma lógica, razão pela qual, neste trabalho, o foco da definição de fontes renováveis de energia será alterado. Toda essa análise remete para a seguinte proposta de definição (SEVERINO, 2008):

> Uma fonte renovável de energia é aquela cuja utilização para a geração de energia elétrica consome apenas recursos renováveis, aqueles geralmente não-passíveis de esgotamento por estarem sujeitos as reposições mais rápidas do que a sua utilização energética ou, no mínimo, compatível com ela.

Avaliando-se as duas novas propostas de definição, constata-se que cada uma delas refere-se a um conceito diferente, razão pela qual são, de fato, independentes, gerando classificações diferentes — fonte de energia alternativa em oposição à fonte de energia convencional; fonte de energia renovável em oposição à fonte de energia não-renovável — que podem relacionar-se de várias formas.

Com base nessas duas novas definições propostas anteriormente, é correto concluir que a expressão **tecnologia da GD** é mais abrangente que apenas a fonte primária de energia que a suprirá assim como é mais abrangente que apenas o processo utilizado para converter a energia dessa fonte primária para a forma elétrica. Na realidade, a tecnologia da GD é a combinação da fonte primária de energia, discutida há pouco, com o processo pelo qual a energia dessa fonte será convertida em eletricidade. Há tecnologias de GD que estão definitivamente vinculadas a uma única fonte primária de energia, como, por exemplo, a tecnologia de painéis fotovoltaicos, que sempre utiliza a radiação solar como fonte primária de energia. Por outro lado, há tecnologias de GD que podem utilizar mais de uma fonte

primária de energia, como, por exemplo, a tecnologia de geração por meio de grupo motor-gerador com motor a combustão interna, que pode empregar como combustível óleo diesel ou gás hidrogênio. Com esse entendimento, será necessária a criação de uma divisão quanto ao aspecto tecnologia da GD, originalmente proposto. Neste trabalho, o aspecto tecnologia da GD será mantido, e será criado um novo aspecto: **a fonte primária de energia**, já discutida.

Em segundo lugar, tecnologias tais como os microgeradores hídricos, os arranjos fotovoltaicos, as turbinas eólicas, os motores a diesel, os sistemas térmicos solares, as células a combustível e as baterias elétricas consistem em determinado número de pequenos módulos que podem ser montados nas fábricas. Esses módulos demandam tempo de instalação bastante pequeno na montagem final da usina geradora. A construção *in loco* requer significativamente menos tempo que o requerido para grandes usinas geradoras centralizadas.

Adicionalmente, cada módulo pode começar a operar tão logo esteja instalado no local, independentemente da situação dos demais módulos. No caso de falha de um módulo, os outros módulos não são afetados por isso. Uma vez que cada módulo é pequeno quando comparado com o tamanho unitário de grandes usinas geradoras centralizadas, o efeito da falha do módulo na potência disponível total de saída é consideravelmente menor. Finalmente, essas tecnologias permitem a adição posterior de módulos ou a transferência de módulos para outros lugares, se necessário.

O terceiro aspecto importante a se considerar é a possibilidade de produção combinada de calor e energia. Turbinas a gás de ciclo combinado, motores de combustão interna, turbinas de combustão, gaseificação de biomassa, processos geotérmicos, motores *stirling*[17] e células a combustível são adequados à produção combinada de calor e energia. Essa produção, por ocorrer em um único lugar, possui alta eficiência processual se o calor for localmente utilizado. Na maioria dos casos, a geração de calor e energia tem estreita correlação, pois o calor a ser utilizado é gerado pelas perdas térmicas da produção de energia elétrica. A tecnologia de produção combinada de calor e energia já é largamente utilizada com turbinas a gás de ciclo combinado, motores de combustão interna, turbinas de combustão, gaseificação de biomassa e células a combustível.

[17] O motor *stirling* é um motor especial de combustão externa que opera com base em diferenças de temperaturas existentes em duas partes diferentes dele.

Conforme mencionado anteriormente, serão feitas duas classificações neste tópico: quanto à fonte primária de energia e quanto à tecnologia empregada para a geração elétrica. A figura 05, a seguir, sintetiza a proposta de classificação de GD quanto à fonte primária de energia feita aqui.

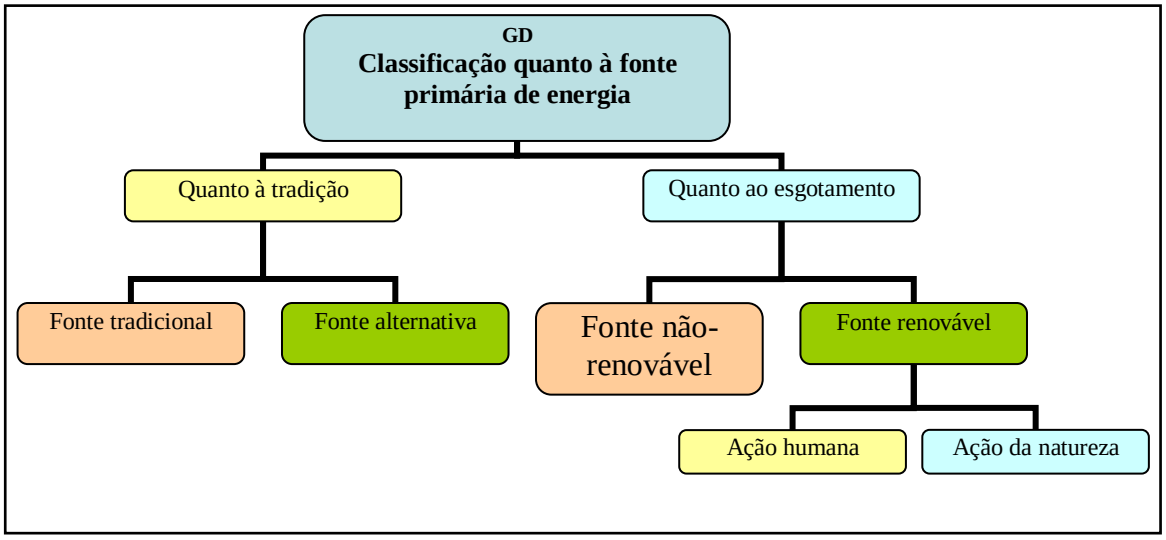


Figura 05: Classificação de GD quanto à Fonte Primária de Energia.

Com base no aqui exposto, as fontes renováveis de energia incluem aquelas em que a reposição dos recursos consumidos para a geração de energia elétrica dá-se pela ação da própria natureza — como no caso das águas dos rios, das marés, do sol e do vento — e aquelas em que a reposição dos recursos consumidos depende da ação humana, na forma de manejo adequado — como no caso da biomassa originada, por exemplo, de cana-de-açúcar, florestas energéticas e resíduos animais, humanos e industriais.

A maioria dessas fontes apresenta características estatísticas e estocásticas, de certa forma cíclica, em períodos de tempo compatível com a operação das usinas de geração elétrica e inferiores à vida útil delas (REIS e SILVEIRA, 2001). Tais fontes podem ser usadas para produzir eletricidade principalmente em usinas hidrelétricas, eólicas, solar-fotovoltaicas e termelétricas.

Por oposição ao que foi feito para fonte renovável, segue uma sugestão de definição para fonte não-renovável de energia (SEVERINO, 2008):

> Uma fonte não-renovável de energia é aquela cuja utilização para a geração de energia elétrica consome apenas recursos não-renováveis, aqueles geralmente passíveis de esgotamento por estarem sujeitos as utilizações mais rápidas do que a sua reposição pela natureza.

Nessa categoria, estão os derivados de petróleo — como a gasolina e óleo diesel —, os combustíveis radioativos — como o urânio, o plutônio e o tório —, a energia geotérmica, o carvão e o gás natural. Atualmente, a utilização dessas fontes para a produção de eletricidade dá-se, principalmente, a partir de uma primeira transformação da energia da fonte primária em energia térmica, por meio de processos como a combustão, a fissão e os processos geotérmicos; a geração elétrica ocorre em seguida, a partir da energia térmica, em processo denominado geração termelétrica. A figura 06, a seguir, sintetiza a proposta de classificação de GD quanto à tecnologia feita aqui.

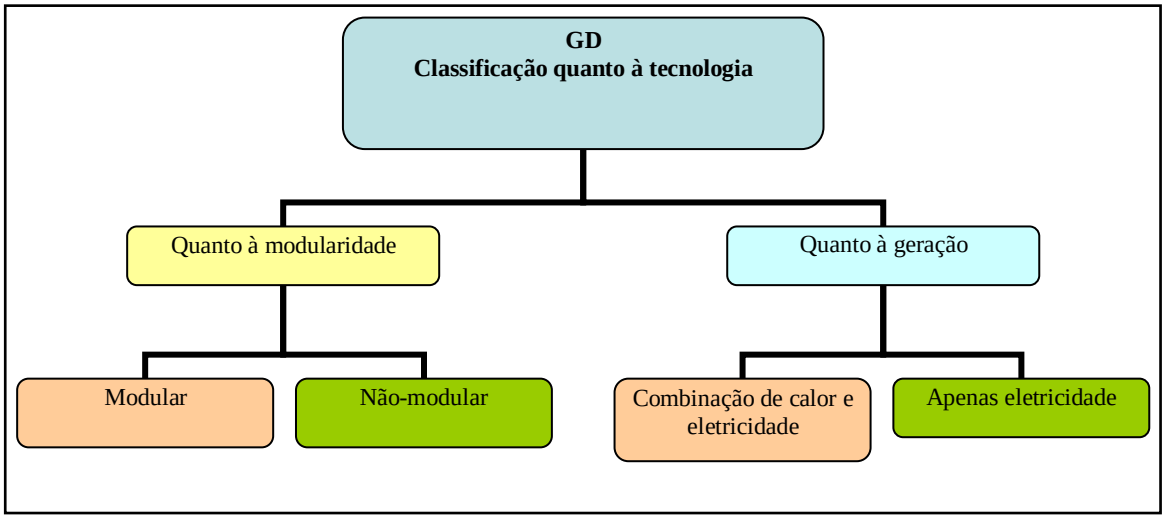


Figura 06: Classificação de GD quanto à Tecnologia. (f) O impacto ambiental – Aspecto não referido nas definições-exemplo.

Freqüentemente, assume-se que as tecnologias de GD são mais ambientalmente amigáveis que as de geração centralizada. Todavia, isso não significa que esse aspecto deva estar explícito na definição de GD. Ademais, a explicitação deste aspecto na definição de GD seria extremamente difícil, pois a análise do impacto ambiental de uma tecnologia é demasiadamente complexa pelas seguintes razões: **(a)** Possui caráter intrinsecamente multidisciplinar, em que há diversos fatores relevantes inter-relacionados; **(b)** Envolve fatores de naturezas distintas, como, por exemplo, a técnica de engenharia, a humana, a social e a ambiental; **(c)** Envolve fatores de variação não-previsível; e **(d)** Não possui, em muitos casos, dados históricos anteriores relacionados a situações consideradas equivalentes.

O quadro 03, por exemplo, apresentada por Ackermann, Andersson e Söder (2001b), mostra as mais importantes emissões de poluentes relacionadas à produção de eletricidade com base em diferentes tecnologias e têm cálculos com base na média do *mix* energético alemão e nos valores típicos de eficiência das tecnologias na Alemanha. As informações incluem as emissões diretas — aquelas ocorridas durante a geração elétrica — e as indiretas — aquelas ocorridas durante a fabricação da unidade geradora e na exploração e no transporte dos recursos energéticos.

Conforme as informações do quadro 03, as emissões das tecnologias típicas de GD são significativamente inferiores às das emissões das usinas geradoras a carvão. As turbinas a gás de ciclo combinado e os grandes geradores hidráulicos também apresentam emissões de CO_2 e de SO_2 significativamente menores que as das usinas geradoras a carvão.

Quadro 03: Comparação entre Tempo de Amortização de Energia e Emisões de Diversas Tecnologias Energéticas

Tecnologia		**Tempo de retorno de energia (meses)**[a]	**SO_2 (kg/GWh)**	**NO_x (kg/GWh)**	**CO_2 (t/GWh)**	**CO_2 e CO_2 equivalente de metano (t/GWh)**
Queima de carvão (jazida)		1,0 – 1,1	630 – 1.370	630 – 1.560	830 – 920	1.240
Nuclear		ND[b]	ND	ND	ND	28 – 54
Gás (TGCC)		0,4	45 – 140	650 – 810	370 – 420	450
Grande hidrelétrica		5 – 6	18 – 21	34 – 40	7 – 8	5
Tecnologias renováveis de GD						
Micro-hidrelétrica		9 – 11	38 – 46	71 – 86	16 – 20	ND
Pequena hidrelétrica		8 – 9	24 – 29	46 – 56	10 – 12	2
Turbina eólica	4,5 m/s	6 – 20	18 – 32	26 – 43	19 – 34	ND
	5,5 m/s	4 – 13	13 – 20	18 – 27	13 – 22	ND
	6,5 m/s	2 – 8	10 – 16	14 – 22	10 – 17	11
Fotovoltaica	Monocristalino	72 – 93	230 – 295	270 – 340	200 – 260	ND
	Policristalino	58 – 74	260 – 330	250 – 310	190 – 250	228
	Amorfo	51 – 66	135 – 175	160 – 200	170 – 220	ND
Geotérmica		ND	ND	ND	ND	50 – 70
Marés		ND	ND	ND	ND	2

Fonte:ACKERMANN *et al.*, 2001b. (modificado)

(a) Também conhecido como tempo de *payback* de energia, corresponde ao tempo necessário para que a tecnologia gere energia elétrica equivalente à utilizada na fabricação do gerador.

(b) ND significa informação não-disponível.

Baterias e células a combustível não têm emissões diretas. Em combinação com as emissões ocorridas durante o processo de fabricação, a mistura de combustíveis utilizada para a produção da eletricidade armazenada nas baterias deve ser considerada nos cálculos das emissões indiretas das baterias. No caso das células a combustível, as emissões indiretas também dependem da combinação dos tipos de energia que são requeridos para se produzir hidrogênio porque o hidrogênio não pode ser explorado diretamente da natureza.

Benefícios ambientais adicionais, resultantes, por exemplo, da redução das perdas nas linhas de transmissão, obtidos em função da localização e do tamanho da usina, podem melhorar o balanço ambiental da GD. Não obstante, alguns ponderam que uma grande quantidade de GD poderia forçar as grandes unidades a operar abaixo de sua eficiência ótima, o que levaria ao aumento nas emissões por kWh produzido (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001b). Outros aspectos que tornam uma comparação ambiental muito difícil são as diferentes percepções relativas ao risco inerente às usinas nucleares e as relacionadas aos impactos visuais e sonoros e às exigências de extensão territorial das turbinas eólicas, por exemplo.

Sendo assim, as tecnologias que podem ser utilizadas para GD não podem ser descritas de modo genérico como ambientalmente amigáveis. Todavia, no que diz respeito ao aspecto ambiental mais importante nos dias de hoje, o efeito estufa, o conjunto de todas as tecnologias de GD leva a emissões significativamente menores que as relacionadas às tecnologias com base no carvão, a mais poluente segundo a tabela 03.

Em razão desses argumentos, Ackermann, Andersson e Söder (2001a) defendem que esse aspecto não é relevante para a definição de GD, opinião seguida por El-Khattam e Salama (2004) e, pelo que se pode concluir, por todos os autores e instituições propositores das definições-exemplo, haja vista que nenhuma delas explicita o impacto ambiental da GD. Então, neste trabalho, também será feita esta consideração. Todavia, é interessante adotar-se uma classificação de GD quanto ao impacto ambiental, para uso futuro. A figura 07, a seguir, sintetiza a aqui proposta classificação de GD quanto ao impacto ambiental, feita com base em informações da tabela 03. Essa classificação, devidamente adaptada, tem potencial para possibilitar comparações objetivas entre diferentes projetos de GD no que tange ao impacto ambiental, bastando, para isso, a definição adequada e objetiva dos graus baixo, médio e alto nela apresentados.

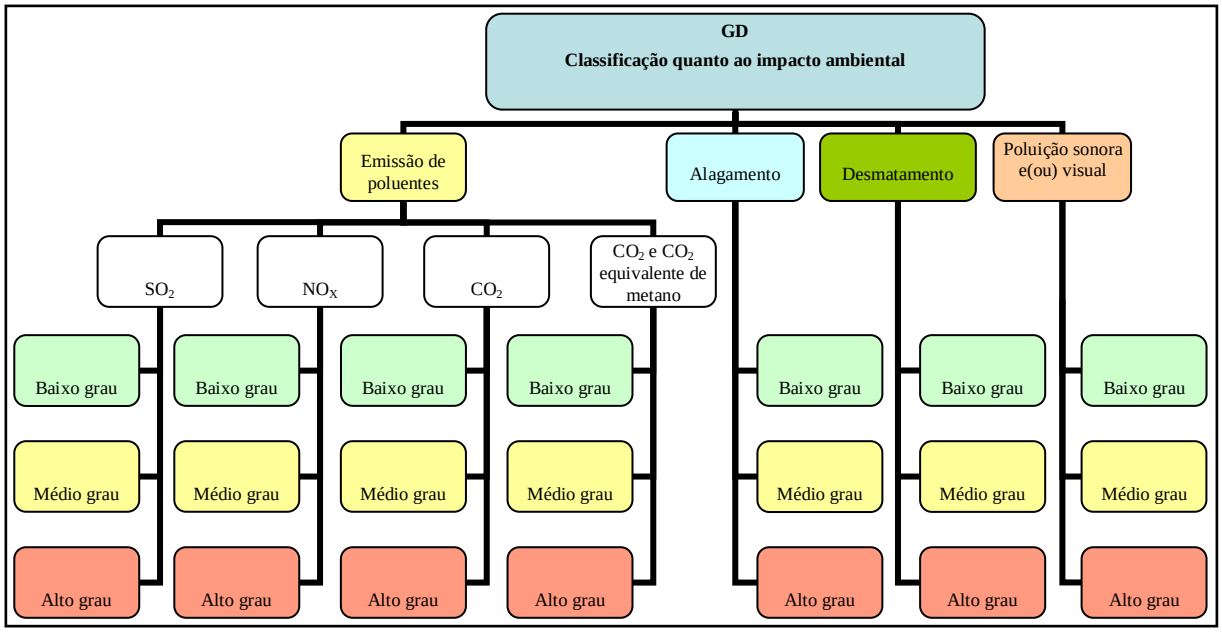


Figura 07: Classificação de GD quanto ao Impacto Ambiental. (g) O modo de operação – Aspecto referido apenas nas definições-exemplo (20) e (21).

Há a visão disseminada de que a GD é relativamente desobstruída pelas regras de operação dos sistemas centralizados, sendo um recurso de geração de energia que não é associado às complexidades das operações do sistema de geração convencional, tais como o planejamento do despacho, *pool pricing*[18] e o despacho em si (SHARMA e BARTELS *apud* ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a). Contudo, Ackermann, Andersson e Söder (2001a) defendem que, para a definição de GD, o modo de operação não é relevante, opinião compartilhada por El-Khattam e Salama (2004) e utilizada neste trabalho.

Essa defesa tem como principal argumento o fato de que as regras de operação de sistemas elétricos variam muito entre países, entre regiões de um mesmo país e até mesmo entre épocas diferentes do ano na mesma região de um país. Como exemplo disso, pode-se retomar o caso das regulamentações inglesas e galesas: uma unidade geradora com capacidade superior a 100 MW conectada ao sistema de distribuição seria tratada pelas regras de mercado como uma unidade de geração centralizada, mas uma unidade geradora com capacidade inferior a 100 MW poderia ser menos obstruída pelas regras de operação.

[18] É definido por meio de licitações de venda de lotes de geração, para determinar que unidades de geração estarão disponíveis para produzir, combinadas com estimativas de demanda (Rodríguez, 2002).

Em razão disso, não se pode assumir, como regra geral, que a GD é relativamente desobstruída pelas regras de operação dos sistemas elétricos. Todavia, Ackermann, Andersson e Söder (2001a) defendem que, em situações em que a GD recebe tratamento especial pela regulamentação, esse fato pode ser especialmente mencionado, como, por exemplo, pela expressão **geração distribuída não centralmente despachada**.

Não obstante, seguindo a mesma lógica anteriormente utilizada para outros aspectos, é interessante adotar-se uma classificação de GD quanto ao modo de operação, para uso futuro. A figura 08, a seguir, sintetiza a aqui proposta classificação de GD quanto a esse aspecto.

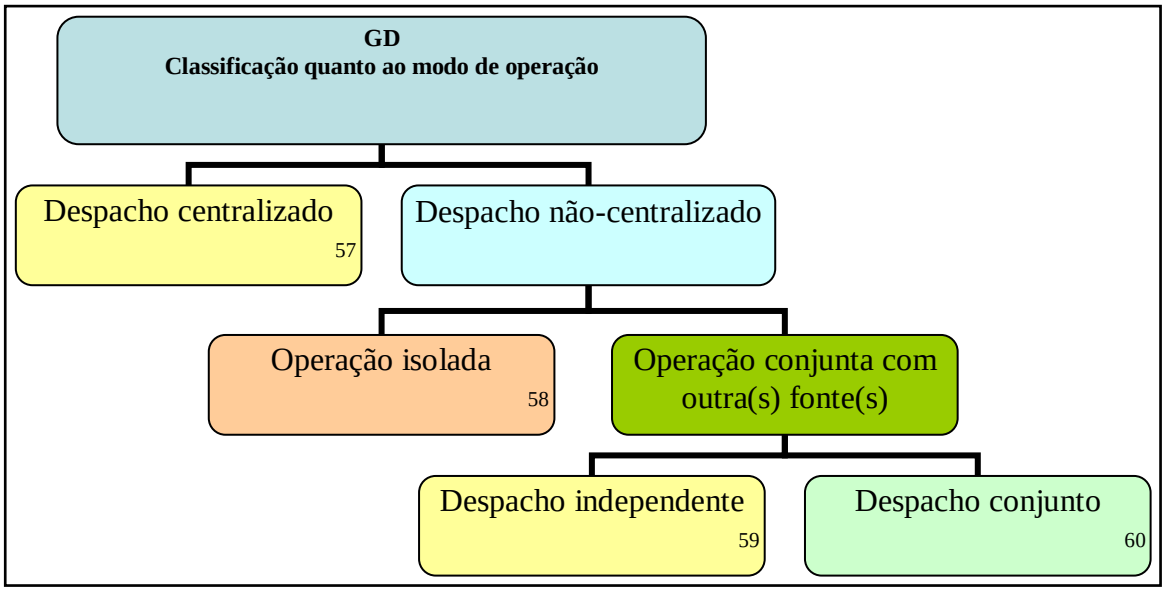


Figura 08: Classificação de GD quanto ao Modo de Operação. (h) A propriedade – Aspecto referido apenas nas definições-exemplo (7), (8), (10), (11) e (18).

Para se estudar o efeito da implementação de fontes de GD nas redes de transmissão e de distribuição, é necessário que se verifiquem as restrições operacionais. Para isso, devem ser realizados estudos de operação em regime permanente e em regime transitório, como é o caso das discussões realizadas por El-Khattam e Salama (2004) e por Severino *et al.*, (2004). Todavia, o aprofundamento deste tema não será feito aqui, pois foge do escopo deste trabalho.

É comum a idéia de que uma geração apenas é classificada como GD se for propriedade de um PIE ou de um consumidor, conforme pode ser verificado nas definições-exemplo (7), (10) e (11). É claro que, se a GD representa a quebra de um paradigma, ela incorpora a idéia de que os tradicionais proprietários de usinas geradoras serão substituídos por outros tipos de

proprietários, que incluem o PIE, o autoprodutor e o cogerador — definido aqui como aquele que opera a co-geração.

A experiência internacional mostra que, assim como em outros aspectos, as realidades variam muito de um local para outro. Na Suécia, por exemplo, estão envolvidos na GD tanto PIEs quanto geradores tradicionais (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a). Em muitos outros países, entretanto, as grandes companhias de geração estão, muitas vezes, bastante inflexíveis quanto ao desenvolvimento de pequenos sistemas de GD. Ademais, há forte evidência de que projetos desenvolvidos por companhias locais e parcialmente financiados com envolvimento regional têm mais apoio popular que projetos de outras organizações (GRUBB *apud* ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a). Apesar disso, as grandes empresas de geração estão cada vez mais interessadas no assunto, fato já anunciado por Dunn e Flavin (2000), ao citarem os investimentos feitos por empresas gigantes, como a *BP Amoco* e a *General Electric*. De fato, não há nenhuma razão óbvia para que a GD deva ser limitada a proprietários independentes. Não obstante esses fatos é importante enfatizar que os aspectos de propriedade da GD podem ser imprescindíveis para o desenvolvimento dela porque a propriedade solicita investimentos e aponta para lucros e controle de utilização, que é uma forma de poder. Em razão disso, Ackermann, Andersson e Söder (2001a) não consideram a propriedade fator relevante para a definição de GD, opinião que é seguida neste trabalho. Mesmo assim, é interessante adotar-se uma classificação de GD quanto à propriedade, para uso futuro. A figura 09 sintetiza a proposta de classificação de GD quanto a esse aspecto feita aqui.

Acerca da quantidade total de GD vinculada a uma rede de distribuição, alguns autores acreditam que a GD caminha para a geração de energia completamente descentralizada, que não requereria, portanto, linhas de transmissão nem grandes usinas geradoras centralizadas (MILBORROW *apud* ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a). As maiorias dos autores, entretanto, mais conservadores, crêem que a GD será capaz de suprir apenas uma fração da demanda local de energia, sendo que o restante da energia necessária seria, ainda, suprida pelos sistemas elétricos convencionais, conforme pode ser visto em todas as definições-exemplo que mencionam, explícita ou implicitamente, este aspecto.

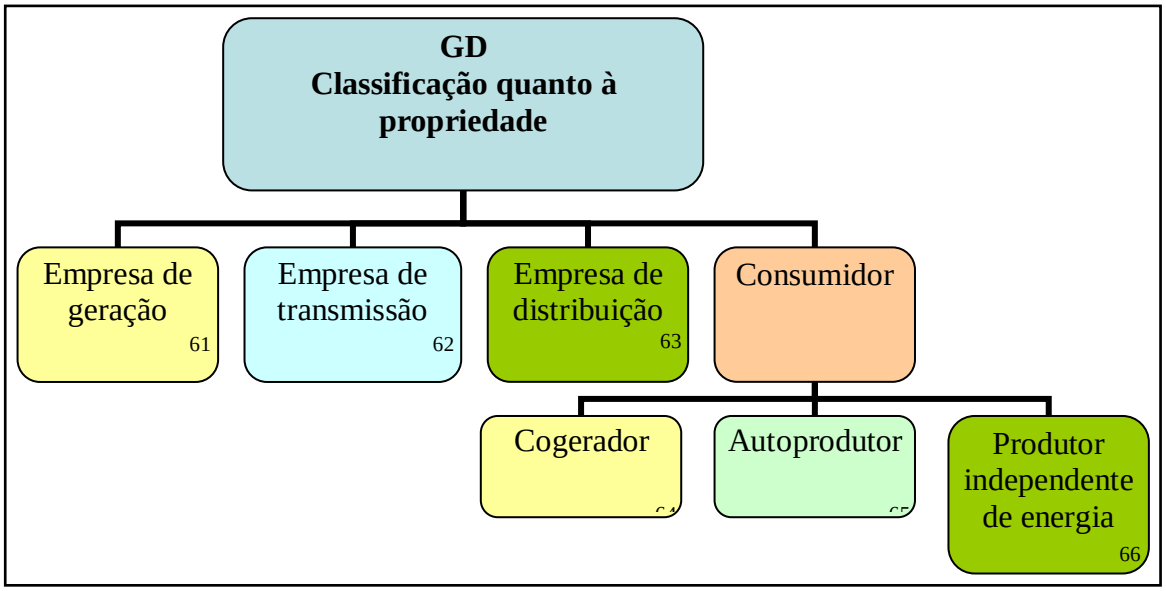


Figura 09: Classificação de GD quanto à Propriedade. (i) O Nível de Penetração – Aspecto referido apenas nas definições-exemplo (2), (3), (6), (8) e (10).

A definição do nível de penetração da GD é por si só, problemática, uma vez que esse nível deve ser tratado em termos relativos a outro(s) fatore(s). A simples indicação da potência gerada na GD não determina o nível de penetração, ou de influência, da GD no sistema elétrico ao qual ela está conectada, pois uma grande geração em um sistema elétrico de grande porte pode significar menor contribuição relativa que uma pequena geração em um sistema elétrico de pequeno porte. Logo, deve ser reconhecida a importância de se considerar, além da potência, a área de influência da GD na definição do nível de penetração. Então, verifica-se que, a depender da definição da área de influência, a definição do nível de penetração varia. Por exemplo, se a área de influência a ser considerada for um sistema de distribuição local, o nível de penetração é um; se a área de influência a ser considerada for todo o sistema elétrico do país, o nível de penetração é outro. Em razão disso, Ackermann, Andersson e Söder (2001a) julgam que este aspecto não é relevante para a definição de GD, opinião considerada neste trabalho.

Todavia, é importante notar que, se as previsões do EPRI e da *Natural Gas Foundation*, segundo as quais, até 2010, de 25% a 30% da nova geração mundial será na forma de GD, citadas anteriormente, tornarem-se realidade, será de se esperar que a GD seja capaz de suprir a maioria da demanda de energia de certas redes de distribuição. Por essa razão, a análise da GD deve sempre levar em consideração que a penetração da GD pode atingir níveis significativos.

Então, torna-se interessante a adoção de uma classificação de GD quanto ao nível de penetração, para uso futuro. A figura 10, a seguir, sintetiza a aqui proposta classificação de GD quanto a esse aspecto, em que os percentuais indicados referem-se ao percentual da potência gerada pela GD com relação à potência total gerada na área definida previamente como área de influência. Como decorrência da utilização dessa classificação, por exemplo, uma fonte de GD instalada em uma comunidade isolada, não-conectada a nenhum sistema elétrico e a nenhuma outra fonte de eletricidade, teria nível de penetração de 100%, pois seria responsável por todo o suprimento de energia elétrica na área de influência, que, no caso, é a comunidade isolada.

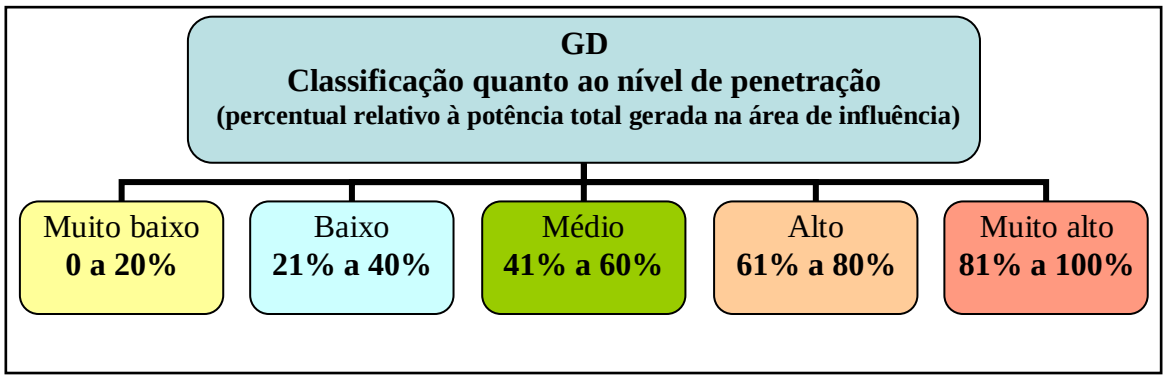


Figura 10: Classificação de GD quanto ao Nível de Penetração.

4.2.2 Definição Proposta para GD

Ackermann, Andersson e Söder (2001a; 2001b), após a descrição de todos esses aspectos, propõem a seguinte definição geral para GD, já apresentada anteriormente na definição-exemplo (13):

> GD é uma fonte de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição ou no lado do consumidor.

Como se pode ver, essa definição apenas cita explicitamente o aspecto do propósito — propósito primário, conforme sugerido anteriormente — e o aspecto da localização da GD, pois, na opinião desses autores, os demais aspectos não são relevantes para a definição. Porém, os autores concluem que, se os últimos aspectos são de interesse, eles devem ser mencionados adicionalmente. A análise e as classificações feitas anteriormente, contudo, remetem para uma proposta de definição mais genérica e, por isso mesmo, de utilização mais universal, apoiada nas classificações auxiliares, que permitem o entendimento correto do conceito de GD construído neste texto.

A geração centralizada, convencional, conforme explicitado anteriormente é a denominação genérica de um conjunto formado por grandes centrais de geração e uma extensa rede de linhas de transmissão e de distribuição alimentando os diversos consumidores. Portanto, conclui-se tratar de um conceito coletivo, e não de apenas uma única usina geradora. Todavia, uma grande central de geração convencional faz parte da geração centralizada, sendo, dela, um caso particular. Seguindo esse mesmo raciocínio para a GD e considerando toda a análise feita, apresenta-se, aqui, a seguinte proposta de definição (SEVERINO, 2008):

> GD é a denominação genérica de um tipo de geração de energia elétrica que se diferencia da realizada pela geração centralizada por ocorrer em locais em que não seria instalada uma usina geradora convencional, contribuindo para aumentar a distribuição geográfica da geração de energia elétrica em determinada região.

Considerando-se a definição anterior, propõe-se o seguinte detalhamento explicativo para um caso particular de GD (SEVERINO, 2008):

> Uma fonte de energia elétrica é considerada caso particular de GD quando ela: (a) está conectada diretamente a rede de distribuição; (b) está conectada do lado de um consumidor conectado a algum ponto do sistema elétrico; (c) supre cargas elétricas de uma instalação eletricamente isolada; ou (d) está conectada diretamente a rede de transmissão, desde que, neste caso, ela não possa ser considerada caso pertencente à geração centralizada.

Com essa definição bastante genérica — que procura diferenciar GD de geração centralizada nos aspectos em que elas realmente se diferenciam de forma relevante e pretende abranger, com suficiente precisão, todos os casos possíveis de serem classificados como GD —, os interessados poderão, com o uso das classificações aqui sugeridas, adaptar as suas próprias realidades ao conceito de GD construído neste texto, para as utilizações que julgarem convenientes. Para facilitar esse trabalho, foi construída a Figura 11, que apresenta a síntese das classificações apresentadas. Nela, cada seta numerada corresponde à possibilidade de classificação do aspecto analisado, representada pelo quadro de mesmo número localizado em uma das figuras de 01 a10.

A definição aqui proposta, associada às propostas de classificação de diversos de seus aspectos, tem potencial para, com os ajustes necessários, servir de importante instrumento de gestão governamental de projetos de geração elétrica, pois permite classificar diversos projetos de geração elétrica e, então, decidir, com base em premissas e prioridades estabelecidas para determinada situação, qual (ais) projeto(s) receberá (ão) investimentos públicos para a implementação.

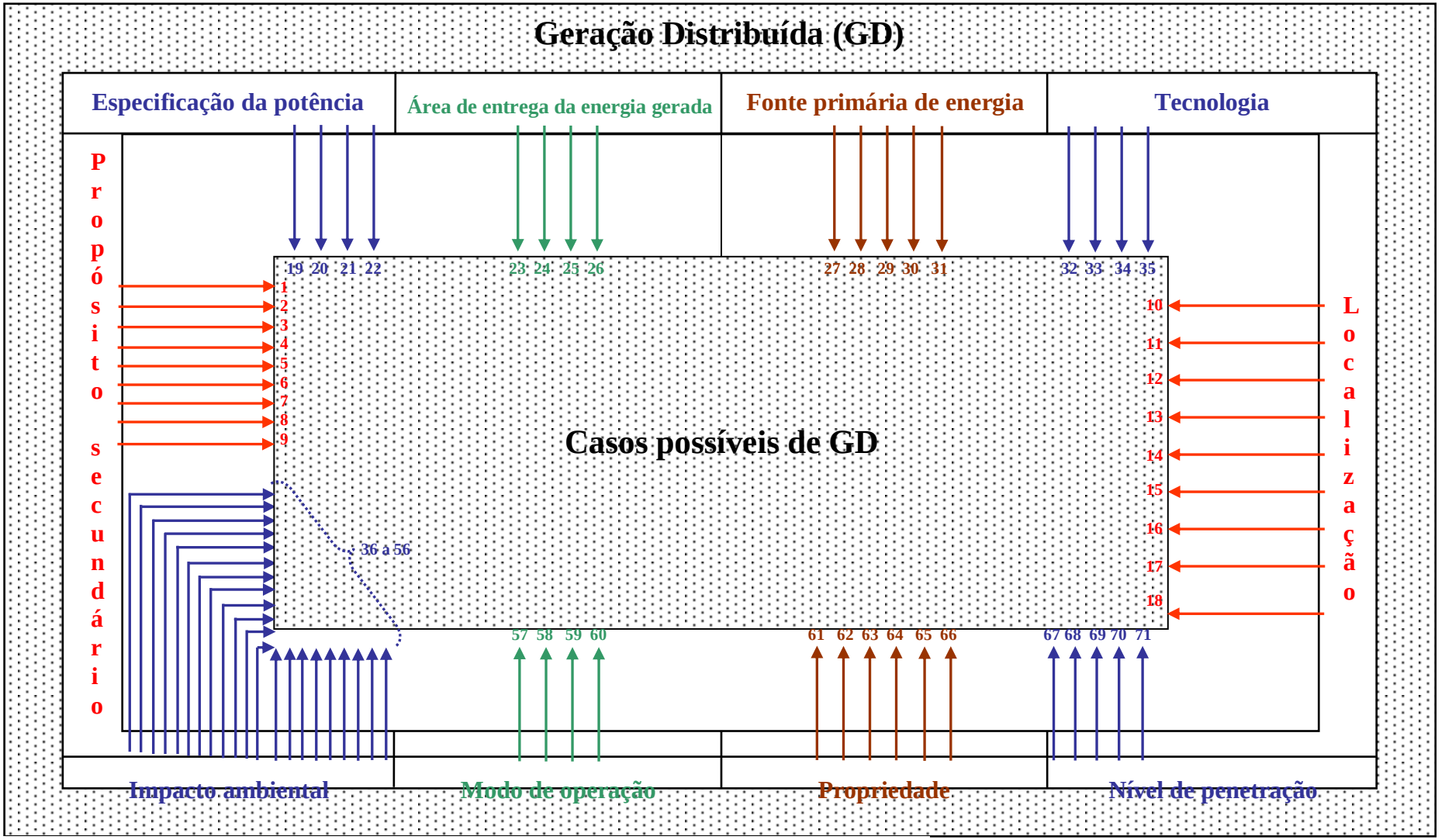


Figura 11: Classificações possíveis de GD.

Com isso, ele seria um instrumento que produziria avaliação de caráter unicamente meritório, com muito mais objetividade que a usual nesse tipo de procedimento. Ademais, as definições e classificações propostas neste trabalho poderão ser úteis para o aprimoramento da legislação nacional, contribuindo para o estabelecimento de um necessário novo paradigma no setor elétrico.

Adicionalmente, como resultado dessas discussões, vislumbra-se a possibilidade da definição futura de um índice que informaria, para determinada região geográfica — que poderia ser um município, um estado, um país ou uma região definida por homogeneidade climática —, o grau de distribuição da geração de energia elétrica. Esse índice, que poderia ser denominado **índice de distribuição da geração**, seria calculado, para essa região de interesse, com base em parâmetros como a área da região, a população total da região, a população da região sem atendimento elétrico, a contribuição da região para o produto interno bruto (PIB) do país a que a região pertence, a renda *per capita* da população da região, o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) da região, o número de pontos de geração elétrica na região, a potência elétrica total instalada na região, o consumo médio anual *per capita* de energia elétrica da população da região, entre outros. Esse índice poderia compor o conjunto de avaliadores da qualidade do sistema elétrico da região e da qualidade de vida daquela população; sendo assim, poderia ser utilizado no processo decisório relativo a novos investimentos públicos e (ou) privados na região.

4.3 OUTROS CONCEITOS

4.3.1 Recursos Distribuídos

Recursos distribuídos são recursos existentes no lado da fonte de energia e no lado da demanda de energia que podem ser efetivamente utilizados por todo um sistema elétrico de distribuição — que é distinto do sistema de transmissão — para suprir as necessidades de energia e de confiabilidade dos consumidores servidos por esse sistema. Recursos distribuídos podem, assim, ser instalados tanto no lado do consumidor quanto no lado do sistema (MOSKOVITZ *apud* ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a).

Os recursos distribuídos consistem em dois aspectos: **(a)** GD, localizada no sistema de distribuição ou no lado do consumidor; e **(b)** recursos no lado da demanda, tais como um sistema de gerenciamento de carga para deslocar consumo de eletricidade do horário de pico para horários fora do pico e opções de eficiência energética para, por exemplo, reduzir o pico de demanda, para aumentar a eficiência das edificações ou de acionamentos industriais ou para reduzir a demanda geral por eletricidade. Um importante aspecto do conceito de recursos distribuídos é que os recursos do lado da demanda não têm base apenas em geração local no sistema elétrico no lado do consumidor, mas também como modo de reduzir a demanda consumidora. Isso influenciará o suprimento de eletricidade a partir da rede de distribuição (ACKERMANN, 2004).

Fica claro que esse conceito aplica-se, sem dúvida, ao caso de fonte de GD conectada, direta ou indiretamente, a sistema de distribuição. Porém, não há razão para não se considerar a aplicação dele, com algumas pequenas adaptações, ao caso de conexão a rede de transmissão e ao caso de alimentação de instalações isoladas. Nesses dois casos, também, há fonte de GD e há demanda, sendo, portanto, adequado que se gerenciem os recursos no lado da demanda. Esse último caso remete ao terceiro aspecto de similaridade entre a GD e os antigos sistemas elétricos de potência, referido no subitem 4.3.

4.3.2 Capacidade Distribuída

Essa expressão é menos conhecida que GD e que recursos distribuídos, provavelmente porque trata-se de uma definição bem mais difícil de se fazer. Segundo Ackermann, Andersson e Söder (2001a) e Ackermann (2004), ela inclui todos os aspectos dos recursos distribuídos adicionados aos requerimentos para capacidade de transmissão/distribuição. Um bom exemplo pode ajudar a melhor distinguir entre GD e capacidade distribuída. Um dos objetivos do uso da GD é reduzir o pico de demanda. Contudo, GD não inclui nenhuma capacidade de reserva, razão pela qual a rede de transmissão/distribuição normalmente tem de ser capaz de cobrir, no mínimo, alguma parte da geração usualmente suprida pela GD. Com isso, as linhas de transmissão/distribuição serão sobredimensionadas, o fator de carga será pior que sem a existência da GD, e o operador do sistema de transmissão/distribuição cobrirá os custos do sobredimensionamento dos sistemas com o aumento das tarifas.

Nesse ponto, capacidade distribuída inclui todos os aspectos da GD e dos recursos distribuídos adicionados à reserva de capacidade, ou seja, reserva de geradores ou gerenciamento de carga para minimizar as exigências de sobredimensionamento do sistema de transmissão/distribuição.

4.3.3 Serviço de Eletricidade Distribuído

Essa expressão aponta para uma futura arquitetura de rede e de serviço de eletricidade com base em GD, recursos distribuídos e capacidade distribuída (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a; ACKERMANN, 2004). O conceito de serviço de eletricidade distribuído foi desenvolvido nos EUA, onde é bastante utilizado, e não será discutido aqui porque ele não se encontra no escopo deste trabalho.

4.4 ASPECTOS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

As definições anteriores de GD, de recursos distribuídos e de capacidade distribuída não incluem discussão acerca de determinados aspectos das redes de transmissão e de distribuição e de conexão a elas que são muito importantes do ponto de vista técnico, pois há significativas diferenças entre os projetos de redes de transmissão e os de redes de distribuição.

Em primeiro lugar, o propósito das redes de distribuição é diferente daquele das redes de transmissão. A principal diferença é que os sistemas de distribuição não são, normalmente, projetados para a conexão de geradores. Por exemplo, a conexão de GD produz uma mudança na distribuição das correntes de falta, o que pode provocar a necessidade de se reprojetar o sistema local de proteção contra faltas. Ademais, as redes de distribuição normalmente possuem configuração radial ou em *loop*, e não configuração em malha, como as redes de transmissão. Então, o fluxo de carga nas redes de distribuição normalmente é unidirecional, e há pouca ou nenhuma redundância (CARDELL e TABORS *apud* ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a).

Em segundo lugar, linhas com tensões superiores a 69 kV, como é o caso de linhas de transmissão e de algumas linhas de distribuição urbana, têm baixa resistência elétrica em comparação com linhas de distribuição com tensões de 13,8 kV ou inferiores. Naquelas, a

queda de tensão devida à resistência é relativamente pequena quando comparada ao mesmo efeito provocado pela reatância indutiva da linha; logo, a reatância é o parâmetro mais importante para a definição da queda de tensão. Nestas, a relação entre resistência e reatância é mais equilibrada, razão pela qual, nessas linhas, a resistência causa queda de tensão e perdas proporcionalmente grandes, quando comparadas àquelas das linhas de transmissão (ACKERMANN, GARNER e GARDINER, 1999). Dessa forma, a conexão de fontes de GD na rede de distribuição pode ter influência significativa no nível de tensão local e nas perdas do sistema.

Finalmente, os terminais de baixa tensão dos sistemas de distribuição não são ainda normalmente conectados a sistemas de supervisão de controle e aquisição de dados — *Supervisory Control and Data Aquisicion* (SCADA). A coleta de dados requerida para o controle do sistema de distribuição, bem como das unidades de GD, é, então, difícil. A complexidade dessa coleta para controle do sistema em mercado competitivo é aumentada pelo fato de que os PIEs operam suas fontes de GD de acordo com os preços do mercado, que não necessariamente correspondem às necessidades de controle do sistema em áreas de distribuição locais. De fato, em muitos casos, os principais objetivos dos PIEs são vender energia elétrica e cumprir contratos (SEVERINO *et al*., 2004).

4.5 ASPECTOS DE CONEXÃO

A tecnologia de geração de eletricidade e a conexão à rede para fontes de GD podem ser significativamente diferentes das utilizadas para as tecnologias de geração centralizada. Grandes usinas utilizam geradores síncronos, que, por exemplo, são capazes de controlar o fluxo de potência reativa. Grandes usinas de GD, utilizando, por exemplo, gás natural, também utilizam geradores síncronos. Usinas de GD de porte médio e, principalmente, as de pequeno porte, freqüentemente utilizam geradores de indução, que são muito mais baratos que os geradores síncronos. Contudo, os geradores de indução não possuem a flexibilidade operacional dos síncronos: por exemplo, um gerador de indução diretamente conectado à rede não é capaz de prover energia reativa, pois ele necessita utilizar a energia reativa da rede durante a partida e o funcionamento. Para superar as desvantagens dos geradores de indução diretamente conectados à rede, os fabricantes de tecnologias para GD têm utilizado diversas

opções, que incluem capacitores e sofisticados conversores eletrônicos de potência (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a).

Para os sistemas de GD que geram CC, tais como módulos fotovoltaicos, baterias e células a combustível, a conexão à rede deve ser feita com o uso de interface, de conversor CC–CA. Atualmente, existem interfaces eletrônicas de potência que oferecem diferentes soluções para converter CC em tensão e correntes ativa e reativa CA com a freqüência desejada. Como se pode imaginar, os conversores eletrônicos de potência introduzem novos requisitos de controle e novas possibilidades para a integração à rede. Conforme exemplificam Ackermann, Garner e Gardiner (1999), eles podem ser utilizados para controle de tensão na rede de distribuição. Todavia, é necessário se garantir que eventuais problemas de controle não produzam flutuações de potência ou oscilações nas redes de distribuição como decorrência da interação dos diversos conversores via rede de distribuição (HEIER *apud* ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a).

Essa grande variedade de opções para a conexão à rede de fontes de GD torna a análise do problema muito complexa. Ademais, as condições da rede local têm importante influência nos aspectos relevantes de integração. Em razão disso, cada rede requererá análise individual detalhada.

O desenvolvimento de padrões industriais para projetos de conexão de fontes de GD que abranjam aspectos externos e internos de controle da interface é etapa imprescindível para a redução dessa complexidade. Hoje em dia, a maioria dos operadores de redes de distribuição precisa utilizar padrões comuns de interconexão das fontes de GD para a operação segura da rede. Muitos desses padrões têm base em recomendações do *American National Standards Institute* (ANSI) e do IEEE. Contudo, a maioria desses padrões não distingue turbinas a gás de ciclo combinado de médio porte de microsistemas fotovoltaicos (WONG e MARTIN *apud* ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001a). Adicionalmente, proprietários das fontes de GD e operadores de redes de distribuição freqüentemente discordam a respeito dos padrões adequados de interconexão.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos especialistas da área consideram que os atuais sistemas elétricos não conseguirão garantir o suprimento sustentável de energia elétrica com a abrangência e a qualidade exigidas pela sociedade do século XXI.

Esse fato, associado ao enorme avanço tecnológico dos últimos anos, abre razoável espaço para a expansão da geração distribuída (GD), tendo como um dos focos principais o fornecimento de energia elétrica a quem ainda não tem acesso a ela.

No Brasil, a discussão acerca desse tema é imprescindível porque o país: **(a)** ainda tem a necessidade de suprir energia elétrica a expressiva parcela de sua população; **(b)** tem o compromisso legal da universalização do acesso à energia elétrica; **(c)** piorou a qualidade ambiental da sua matriz energética nos últimos anos; **(d)** pode ter a segurança hídrica necessária à sua principal fonte de geração de energia elétrica comprometida pelas mudanças climáticas anunciadas; **(e)** está suscetível ao aumento do risco de que ocorra desabastecimento de energia elétrica e ao aumento da insegurança para toda a sociedade, com fortes impactos econômicos, em razão da insuficiência de gás natural e de água nos reservatórios; e **(f)** possui enorme potencial a ser explorado nessa área.

Dessa forma, com a consideração de que o tema GD é bastante importante, controverso e não-consolidado, faz-se necessário que ele seja amplamente debatido, a começar por uma profunda discussão conceitual. Este capítulo, reconhecendo essa necessidade, discutiu, de forma inédita, o conceito de GD e conceitos e aspectos relacionados a ela; propôs novas classificações de aspectos relativos à GD; propôs uma nova definição de GD, mais completa e com mais aplicabilidade que as existentes; sugeriu a inédita utilização das definições e classificações propostas como instrumento útil de gestão governamental de projetos de geração elétrica; e, finalmente, propôs a criação futura do índice de distribuição da geração, a ser utilizado como avaliador da qualidade do sistema elétrico de determinada região geográfica e da qualidade de vida da população que lá vive e como instrumento no processo decisório relativo a novos investimentos em geração elétrica.

A definição de GD aqui proposta, associada às propostas de classificação de diversos de seus aspectos, tem potencial para, com os ajustes necessários, servir de importante instrumento de gestão governamental de projetos de geração elétrica, com capacidade de realizar avaliação de

caráter unicamente meritório, com muito mais objetividade que a usual nesse tipo de procedimento. Ademais, as definições e classificações propostas neste texto poderão ser úteis para o aprimoramento da legislação nacional, contribuindo para o estabelecimento de um necessário novo paradigma no setor elétrico.

REFERÊNCIAS

5th RESEARCH FRAMEWORK PROGRAMME OF THE EUROPEAN UNION: Energy, environment and sustainable development, Part B Energy. *Decentralized generation technologies*: potencials, success factors and impacts in the liberalized EU energy markets (DECENT): Final Report. [S.l.: s.n.]: 2002.

ACKERMANN, Thomas. *Distributed resources in a re-regulated market environment*. 2004. 461 f. Tese (Doctoral Dissertation)–Department of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2004.

ACKERMANN, Thomas; ANDERSSON, Göran; SÖDER, Lennart. Distributed generation: a definition. In: *Electric Power Systems Research*, Elsevier Science, Oxford, UK, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001a.

_____. What is distributed generation? In: *International Symposium on Distributed Generation*: Power Systems and Market Aspects, Estocolmo, Suécia, jun. 2001b.

ACKERMANN, Thomas; GARNER, K.; GARDINER, A. Wind power generation in weak grids: economic optimization and power quality simulation. In: *Renewable Energy*, Elsevier Science, Oxford, UK, v. 18, n. 2, p. 205–221, 1999.

ALAMEDA POWER & TELECOM. Power Industry Glossary. Disponível em: <www.alamedapt.com/electricity/glossary.html>. Acesso em: 2 de Maio de 2007.

BRASIL. Decreto n.° 5.163, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <www.presidencia.gov.br/legislacao>. Acesso em: 9 de Fevereiro de 2008.

CALIFORNIA ENERGY COMISSION. Investing in renewable electricity generation in California. In: *Guidebook for Emerging Renewables Account*, v. 3, 8. ed. California: 1996.

DUNN, Seth; FLAVIN, Christopher. Sizing up micropower. In: BROWN, Lester R.; FLAVIN, Christopher; FRENCH, Hilary F. (Org.). *State of the world 2000*. Washington: Worldwatch Institute, cap. 8, 2000.

EL-KHATTAM, W; SALAMA, M.M.A. Distributed generation technologies, definitions and benefits. In: *Electric Power Systems Research*, Elsevier Science, Oxford, UK, v. 71, n. 2, p. 119–128, 2004.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. *Novo dicionário eletrônico Aurélio versão 5.0*. Coordenação e edição de Margarida dos Anjos e Marina Baird Ferreira. [S.l.]: Positivo Informática, 2004. 1 CD-ROM.

FUELING THE FUTURE. Glossary. Disponível em: <www.fuelingthefuture.org/contents/glossary.asp>. Acesso em: 2 de Maio de 2007.

GAS MALAYSIA. Glossary. Disponível em: <www.gasmalaysia.com/Default.aspx>. Acesso em: 2 de Maio de 2007.

GAS RESEARCH INSTITUTE. The role of distributed generation in competitive energy markets. In: *Distributed generation forum*, Chicago, EUA, mar. 1999.

GOOGLE. Pesquisa Google – define: distributed generation. Disponível em: <www.google.com.br>. Acesso em: 2 de Maio de 2007.

HOUAISS, Antônio. *Dicionário eletrônico Houaiss da língua portuguesa*. Versão 1.0. [S.l.]: Objetiva, 2001. 1 CD-ROM.

International Energy Agency - IEA. *Energy technologies for the 21st Century*. Paris: 1997.

Instituto Nacional de Eficiência Energética - INEE. *O que é geração distribuída?*. Disponível em: <www.inee.org.br>. Acesso em: 27 dez. 2005.

_____. *O que é geração distribuída?*. Disponível em: <www.inee.org.br>. Acesso em: 2 maio 2007.

INNOVATIVE POWER SYSTEMS. Glossary. Disponível em: <www.ips-solar.com/glossary.htm>. Acesso em: 2 de Maio de 2007.

KIOCERA SOLAR. Solar Glossary. Disponível em: <www.kyocerasolar/com/learn/glossary.html>. Acesso em: 2 de Maio de 2007.

LORA, Electo Eduardo Silva; HADDAD, Jamil (Coord.). *Geração distribuída*: aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

POWER BROKERS: Energy Consulting Firm. Glossary. Disponível em: <www.powerbrokersusa.com/Glossary.html>. Acesso em: 2 de Maio de 2007.

PURCHALA, K. et al. *Distributed generation and the grid integration issues*. Londres: Imperial College London, [2006?].

REIS, Lineu Belico dos. *Geração de energia elétrica*: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade. 3. ed. Barueri: Manole, 2003.

REIS, Lineu Belico dos; SILVEIRA, Semida (Org.). *Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável*: introdução de uma visão multidisciplinar. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2001.

RODRIGUES, Flávia Francesca Capano. *Programação da contratação de energia considerando geração distribuída no novo modelo do setor elétrico brasileiro*. 2006. 171 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica)–Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

RODRÍGUEZ, Carlos Roberto Cervantes. *Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída*: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos)–Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ROMAGNOLI, Henrique Cesar. *Identificação de barreiras à geração distribuída no marco regulatório atual do setor elétrico brasileiro*. 2005. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. *Desafio do Luz para Todos é garantir acesso à energia elétrica na região amazônica*. N.° 64. Brasília, 12 de Junho de 2008.

SEVERINO, Mauro Moura. *Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas da Amazônia*. 2008. 335 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SEVERINO, Mauro Moura et al. The influence of the independent power producers in the dynamic performance of the electric systems. In: IX SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERACIONAL AND EXPANSION PLANNING, 2004, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos**... Rio de Janeiro: CHESF, 2004. SP–119. 1 CD-ROM.

THE INDUSTRIAL ENERGY USERS (IEU – Ohio). Basic electricity terms. Disponível em: <www.ieu-ohio.org/information/education/basic_terms.html>. Acesso em: 2 maio 2007.
US Environmental Protection Agency. EPA – GPP – What Is Green Power? Glossary of Green Power Terms. Disponível em: <www.epa.gov/greenpower/whatis/ glossary.htm>. Acesso em: 2 de Maio de 2007.

VALUTECH SOLUTIONS. Glossary. Disponível em: <www.valutechsolutions. com/glossary.html>. Acesso em: 2 de Maio de 2007.

WIKIPEDIA: the free encyclopedia. Disponível em: <www.en.wikipedia.org/ wiki/Distributed generation>. Acesso em: 2 de Maio de 2007.

WILLIS, H. Lee; SCOTT, Walter G. *Distributed power generation*: planning and evaluation. New York: Marcel Dekker, 2000.

CAPITULO V

GERAÇÃO DE ENERGIA EM COMUNIDADES ISOLADAS: CASO DA COMUNIDADE BOA ESPERANÇA

GERAÇÃO DE ENERGIA EM COMUNIDADES ISOLADAS: CASO DA COMUNIDADE BOA ESPERANÇA

Joel Carlos Zukowski Junior[19]

RESUMO

A energia elétrica tem sido considerada um bem fundamental para o progresso. No entanto, apesar dos programas governamentais para universalizar a disponibilidade deste bem, o Brasil ainda tem muitas comunidades isoladas em que não há disponibilidade de energia elétrica ou energia disponível por tempo suficiente para que ela seja aplicada em outras atividades além da produtiva. Este isolamento se faz, principalmente, devido às condições territoriais. Além deste aspecto, a falta de estrutura produz outro isolamento muito mais danoso, o social. Para promover a inclusão social e o desenvolvimento sustentável alguns requisitos são necessários, dentre eles destaca-se a disponibilização de energia elétrica por períodos maiores que às oito horas do dia comercial e a custo competitivo. Este trabalho tem como objetivo mostrar um estudo de caso da disponibilização de energia elétrica para uma comunidade isolada na região do Jalapão, comunidade Boa Esperança, município de Mateiros, Estado do Tocantins. Foi instalado um sistema híbrido eólico-fotovoltaico com capacidade de gerar 9676,80 kWh anualmente. Esta energia tem como finalidade melhorar o processo produtivo, para tanto foi instalado na oficina comunitária. Além disto, propiciar espaço fora do horário de trabalho para ações sociais da comunidade no galpão da oficina comunitária coma disponibilização de energia firme durante 24h/dia. Os resultados mostraram que o sistema pode ser sustentável desde que a comunidade aproveite o potencial de geração de energia para o processo produtivo.

Palavras-chave: Fontes Renováveis de Energia, Energia Solar, Geração de Energia Descentralizada, Energia Eólica, Sustentabilidade.

5.1 INTRODUÇÃO

Quando se fala em comunidades isoladas, vem a mente regiões remotas do planeta ou grupo de pessoas vivendo no meio da floresta amazônica. No entanto, o conceito de isolamento deve ser encarado não somente como isolamento físico por falta de acesso por estradas pavimentadas ou por pistas convencionais de pouso.

[19] Professor do Mestrado em Agroenergia e Curso Engenharia Ambiental (UFT). E-mail: zukowski@uft.edu.br

Pode-se definir isolamento como a falta de acesso à possibilidade de crescimento econômico, social e político, além de acesso físico a outras localidades. Pode-se acrescentar, ainda, inacessibilidade a educação formal.

Sob este ponto de vista, o Brasil tem muitas localidades isoladas, principalmente, é claro, na região norte do país. Um dos critérios para avaliar o grau de isolamento é a disponibilidade de energia elétrica, fator alavancador do desenvolvimento nos vários aspectos citados porque trás possibilidades diversas, desde acesso ao conhecimento (TV, internet etc.) até melhorias nos processos produtivos.

Segundo Rossi (2007) na maioria dos países as propriedades rurais e comunidades isoladas não são servidas pela rede de distribuição de energia elétrica. O Brasil tem como meta levar energia elétrica às comunidades isoladas e quilombolas como forma de promover o desenvolvimento e a inclusão social através do PROGRAMA NACIONAL DE UNIVERSALIZAÇÃO DO ACESSO E USO DA ENERGIA ELÉTRICA – LUZ PARA TODOS (MME, 2004).

Para tanto várias tecnologias estão sendo testadas. Para que este programa tenha sucesso, as comunidades precisam ter condições de arcar com os custos da utilização desta energia, seja da rede de distribuição, seja por geração independente. Ao se referir a comunidades isoladas da Amazônia legal, Santos & Zukowski Jr. (2007) falam de comunidades nos estado do Pará, Amazonas, e outros do extremo norte do Brasil, inclusive no Estado do Tocantins, onde, sob a ótica inicialmente apresentada, tem regiões isoladas ou comunidade quilombolas onde não havia energia elétrica disponível.

Este trabalho apresenta um estudo de caso onde uma comunidade isolada foi selecionada para receber um sistema de geração de energia híbrido solar e eólico. O Problema: Situação da comunidade antes do projeto. O estado do Tocantins está entre as unidades da federação que compreendem a Amazônia Legal. A tabela 01 mostra as localidades que fazem parte do parque do Jalapão e estão em torno dele.

Tabela 01 - Comunidades dentro e fora do Parque Estadual do Jalapão desprovidas de energia elétrica.

Comunidades dentro	Rios	Casas	Adultos	Crianças	População
Carrapato/Formiga	Carrapato e Formiga	43	39	65	104
Boa Esperança e região*		54	128	118	246
Capão do Modesto/Lageado	Córregos e tributários do Rio Novo	5	12	12	24
Margens do Rio Preto e Brejo Grande	Preto e Brejo Grande	15	45	48	93
Galheiro	Córrego Galheiro/Rio Sono	16	34	35	69
Fazenda Nova	Rio Sono e Rio Prata	24	43	59	102
TOTAL		157	301	337	638

Fonte: Projeto PROBIO, 2002
*A Boa Esperança e Região compreendem 20 localidades

O Município de Mateiros está localizado a leste do Parque Estadual do Jalapão, abrangido pela zona de entorno da unidade. Nesta zona está a sede do Município e a região de Boa Esperança. Esta localidade tem uma população de 246 pessoas em 54 residências, todos são produtores rurais e artesãos (PROBIO, 2002). Por se tratar de uma localidade junto ao Parque do Jalapão, o potencial turístico é muito grande.

Dentre os vários problemas e necessidades desta localidade destacam-se a falta de energia elétrica. A disponibilidade deste bem poderá alavancar o desenvolvimento local através do aumento da visitação por turistas, da produção, da implantação de micro-agroindústrias, dentre outros.

Neste caso apresenta-se uma pequena central de geração de energia elétrica utilizando o sistema solar fotovoltaico associado com geradores eólicos com a finalidade principal de promover o desenvolvimento de pequenas localidades agrícolas. A principal motivação foi evitar o êxodo rural, a pobreza e melhorar a qualidade de vida dos moradores da região em questão. Fazê-lo sem tecnologia é praticamente impossível. No entanto, a maior parte das tecnologias disponíveis depende da oferta de energia elétrica.

Em localidades com potencial turístico, como esta, implantar um sistema sustentável de geração de energia elétrica é fundamental para alavancar o crescimento da localidade. Bem como propiciar meios para o desenvolvimento sustentável. A tabela 02 mostra algumas

necessidades mais urgentes apresentadas pelos moradores da região, onde, a maioria não pode ser satisfeitas sem a disponibilização de energia elétrica.

Tabela 02 – Problemas e Necessidades da Região de Boa Esperança

Necessidades	Necessita energia elétrica
Criação de porco	Iluminação
Plantar mandioca	Conservação do produto
Criação de galinha	Iluminação para aviário
Fruticultura	Armazenamento e conservação do produto in natura e processamento e conservação de compotas etc.
Máquina de arroz	Funcionamento da máquina
Máquina para ralar mandioca	Funcionamento da máquina
Plantar banana	Armazenamento e conservação do produto in natura e processamento e conservação de compotas, doces, etc.
Adubo	
Horta	Sistema de bombeamento de água
Água para irrigação	Sistema de bombeamento de água
Arame para cerca	
Produção de ração para gado	Operação do moinho e misturador
Plantar cana	
Melhorar o engenho de cana	Processamento, obtenção do caldo-de-cana

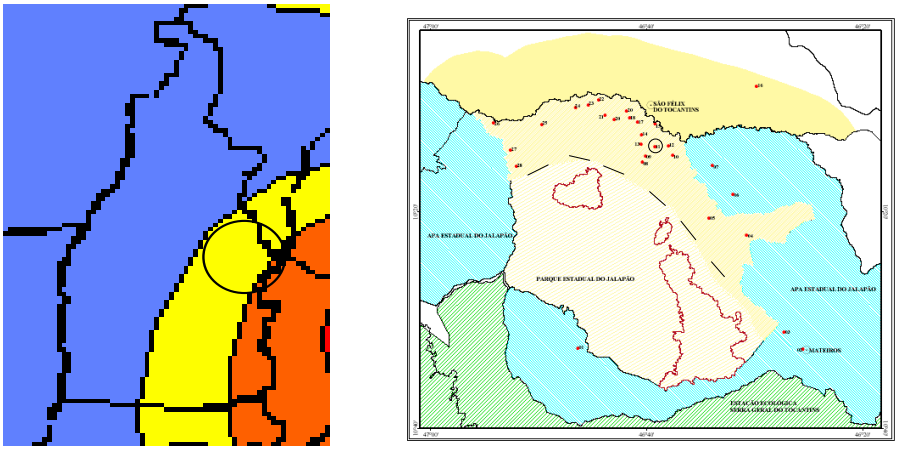
Fonte: PROBIO, 2002 Adaptado.

Da tabela 02 verifica-se que a instalação de uma central de geração de eletricidade para esta localidade pode propiciar um aumento na produtividade, melhoria na qualidade de vida através do aumento das fontes de renda dos moradores pela agregação de valor. Os sistemas de geração de energia elétrica através de células fotovoltaicas e geradores eólicos apresentam um custo inicial alto, comparado com micros centrais hidrelétricas. No entanto, a manutenção no primeiro tipo de sistema é praticamente zero, a vida útil dos equipamentos é superior a 20 anos. Em longo prazo, este tipo de tecnologia é economicamente viável. Além disso, esta região não é servida por rios que possibilitem a instalação deste tipo de sistema.

Dentre as ações necessárias destaca-se o treinamento dos moradores para operarem de forma adequada e segura a central de geração de energia elétrica para garantir a vida útil do sistema e a disponibilidade de energia firme. Associado a isto, avaliou-se os impactos sócio-econômicos e ambientais do sistema de geração de energia elétrica eólico-solar.

5.2 LOCALIZAÇÃO

A comunidade Boa Esperança faz parte da Associação de Artesãos e Extrativistas do Povoado da Mumbuca – Associação Capim dourado, cuja sede está situada no Povoado da Mumbuca, CEP: 77.593-000, Município de Mateiros – TO, CGC Nº 05010011/0001-76. A comunidade está localizada no município de Mateiros a 60 km da sede do município no Parque Estadual do Jalapão. A figura 1.a, mostra a região do Jalapão onde está localizada a Comunidade Boa Esperança. A figura 1.b pontua a localização desta comunidade.



(a) (b)

Figura 01: Localização da Comunidade Boa Esperança

A figura 02 mostra a distância, em linha reta, da sede da Associação Capim dourado e a comunidade Boa Esperança.

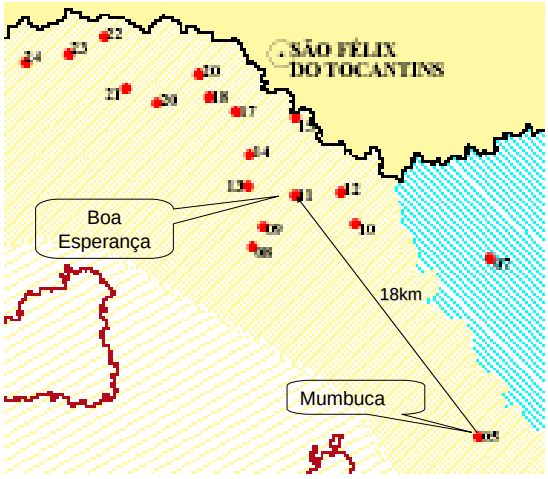


Figura 02: Distância em linha reta entre a comunidade boa esperança e a sede da Associação Capim dourado.

Foram atendidas pelo projeto, diretamente, dez residências que estão mais perto da oficina comunitária já instalada pela própria comunidade. A figura 03 mostra a distribuição das casas. Esta localização foi obtida através de georeferenciamento.

5.3 CRITÉRIOS DE DECISÃO SOBRE O SISTEMA DE GERAÇÃO

A comunidade Boa Esperança é formada por vários agrupamentos de casas, totalizando 54 casas. No entanto devido à dispersão o projeto atendeu ao processo produtivo de 10 casas, conforme mapa da figura 03.

Conforme a tabela 02, a energia elétrica é necessária para vários processos produtivos da comunidade. Neste caso o grupo de pesquisa "Energia no Meio Rural" foi convidado pela comunidade para instalar o projeto GERAR a fim de apoiar o projeto "BENEFICIAMENTO DE FRUTOS DO CERRADO DO JALAPÃO" com apoio financeiro do Programa de Apoio ao Agroextrativismo da Amazônia / MMA cujas metas eram:

- Estruturação física de uma unidade de beneficiamento;
- Produção de sabão vegetal e medicinal;
- Óleos comestíveis e medicinais à base de buriti e do coco de piaçava;
- Beneficiamento do coco de piaçava e do buriti no período de safra dos frutos, dentro dos padrões de qualidade exigidos para a comercialização;
- Conseguir pelo menos dois compradores para os óleos comestíveis e sabão até o final do projeto;

Assim, a demanda de energia seria para atender a este processo produtivo que seria desenvolvido na oficina comunitária (Fig. 04), um galpão coberto com palha de buriti com 14,2m de comprimento e 6,7m de largura, pé direito de 4m. Área útil de 95,15m^2.

No entanto este projeto não foi implantado. A equipe responsável por ele deixou a localidade antes da conclusão do projeto que seria apoiado pelo projeto GERAR. Assim houve a necessidade de se fazer alguns ajustes que serão descritos adiante, já que os objetivos do projeto GERAR, estavam unicamente relacionados com a implantação da micro central híbrida de geração de energia elétrica, o que foi feito.

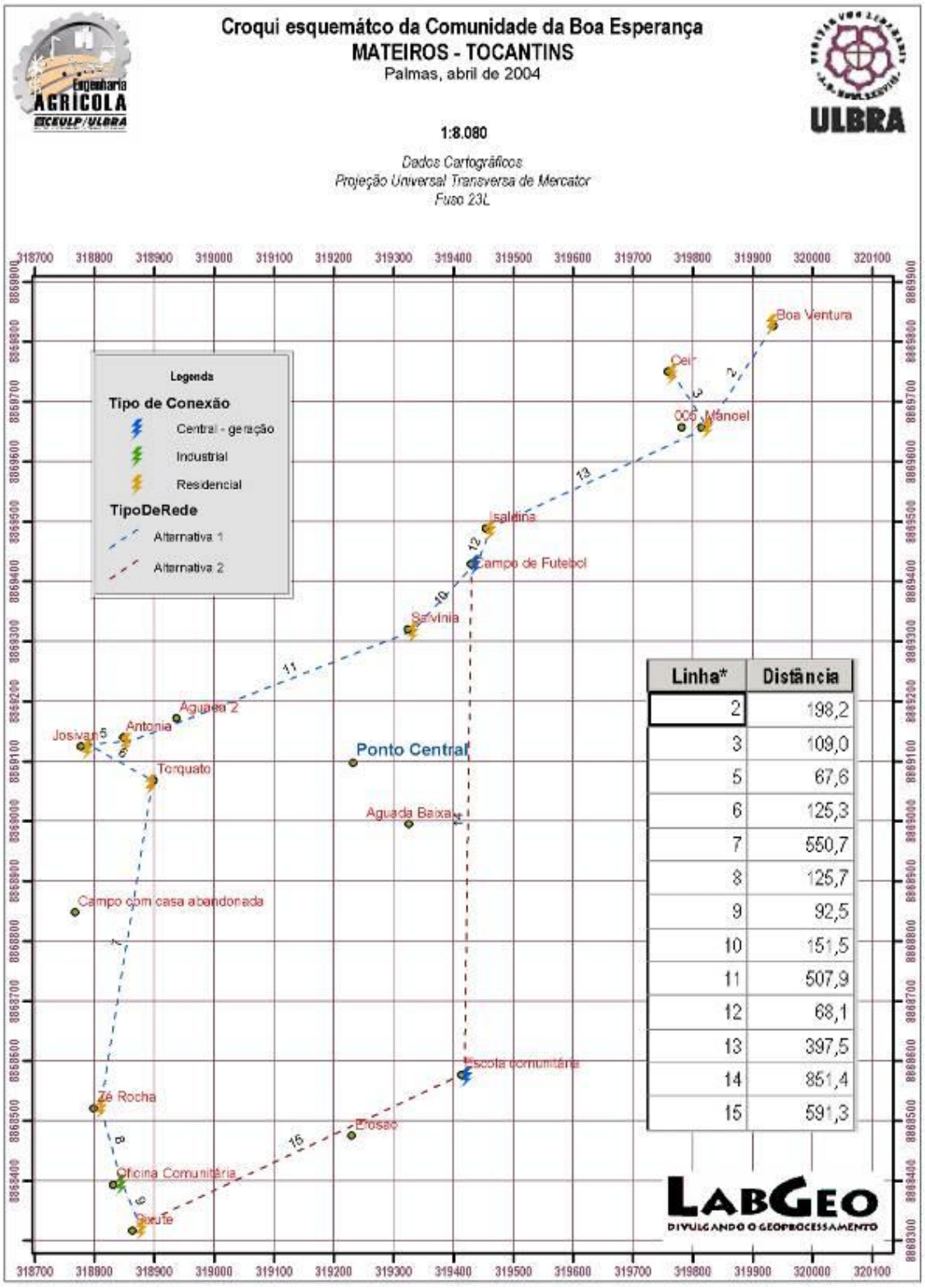


Figura 03: Distribuição das Residências com Indicação de Distâncias e Localização da Instalação de Geração e Rede de Distribuição de Energia Elétrica

5.4 DEMANDA DE ENERGIA

A demanda de energia foi definida em função do processo produtivo que se pretendia desenvolver na oficina comunitária. No total são 6,36 kW com uma produção mensal de 806,40 kWh/mês e um total de 9.676,80 kWh/ano. Na realidade a demanda inicial seria de 300kWh/mês, mas a planta foi dimensionada com capacidade para expansão do processo produtivo.

(a)

(b)

(c)

Figura 04: Oficina Comunitária. (a) Vista Geral. (b) Vista de Dentro, Lado dos Painéis. (c) Vista Lado da Caida d'água.

Os adobes[20] dispostos ao fundo foram confeccionados pela comunidade para fechar as paredes à meia altura da oficina comunitária.

5.5 TIPOS DE ENERGIA E USOS

[20] Tijolo feito de barro e secado ao sol, muito utilizado na região.

O sistema instalado é um sistema híbrido composto por 52 painéis solares da marca KIOCERA com capacidade nominal de 70Wp e três turbinas eólicas da marca ENERSUD, com capacidade nominal de 1kW cada.

A energia atualmente está sendo utilizada para dois processos produtivos:

1. Iluminação do espaço para confecção de artesanato de capim dourado;

2. Produção de farinha em um ralado de mandioca de 1/4hp (Fig. 05 e 06), uma prensa manual e um forno rotativo acionado por motor elétrico.

Figura 05: Máquina de Ralar Mandioca para Produção de Farinha Instalada na Oficina Comunitária

Figura 06: Prensa para Casa de Farinha Utilizada para Extrair Água da Massa e Aumentar o Rendimento do Processo Tanto em Tempo Quanto em Massa.

5.6 SITUAÇÃO SÓCIO ECONÔMICA DAS FAMÍLIAS DA COMUNIDADE

As famílias da comunidade alvas têm, atualmente, atividades agropastoris, criação de gado curraleiro e plantio de mandioca, feijão, arroz, abóbora, melancia (um morador), extrativismo e produção de artesanato de capim dourado. A renda média por família, em espécie, antes da implantação do sistema era de aproximadamente R$200,00/mês por família.
Hoje, com a divulgação pela mídia e através de atravessadores a principal atividade da comunidade é a produção de artesanato de Capim Dourado. Após a implantação do sistema o fluxo de pessoas para a região aumentou devido à cobertura pela mídia.

A instalação da casa de farinha propiciou o aumento da renda, já que aumentou a produtividade da comunidade em relação a este item, bem como a qualidade da farinha produzida, devido à uniformidade da granulometria da farinha.

5.7 IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO HÍBRIDO

5.7.1 Evolução da Instalação

O sistema entrou em operação a plena carga em julho de 2006. As figuras a seguir mostram a evolução do mesmo. Para que o processo fosse desencadeado alguns passos foram necessários. Inicialmente a comunidade deveria demonstrar interesse no projeto para dar prosseguimento à instalação. Uma reunião foi marcada com toda a comunidade, onde compareceu a maioria dos moradores da comunidade.

5.7.2 Primeira Reunião com a Comunidade, Levantamento Georeferenciado da Comunidade

Para apresentar a proposta do projeto foi agendada uma reunião com a comunidade onde compareceram todas as famílias interessadas. A figura 07 mostra a primeira reunião realizada com a comunidade.

Figura 07: Primeira Reunião com a Comunidade para Apresentação da Proposta do Projeto.

Nesta mesma data foi feito o levantamento georeferenciado das casas mais próximas da oficina comunitária, já instalada pela comunidade onde se pretendia disponibilizar energia elétrica. A figura 08 mostra o levantamento da distribuição das casas na comunidade apresentada na figura 03.

Figura 08: Locais na Comunidade que foram Georeferenciados indicando as Casas e demais Propriedades.

5.7.3 Instalação do Sistema de Geração de Energia Elétrica Híbrido

Os painéis solares (Fig. 09) foram instalados ao lado da oficina comunitária que já havia sido construída pela comunidade. Apesar de não ser a melhor localização, já que não está no centro geográfico da comunidade, não foi possível mudar o local porque o lote foi doado por um dos moradores.

(a) (b)

Figura 09: Instalações dos Painéis Solares. (a) Vista de Cima. (b) Vista de Baixo.

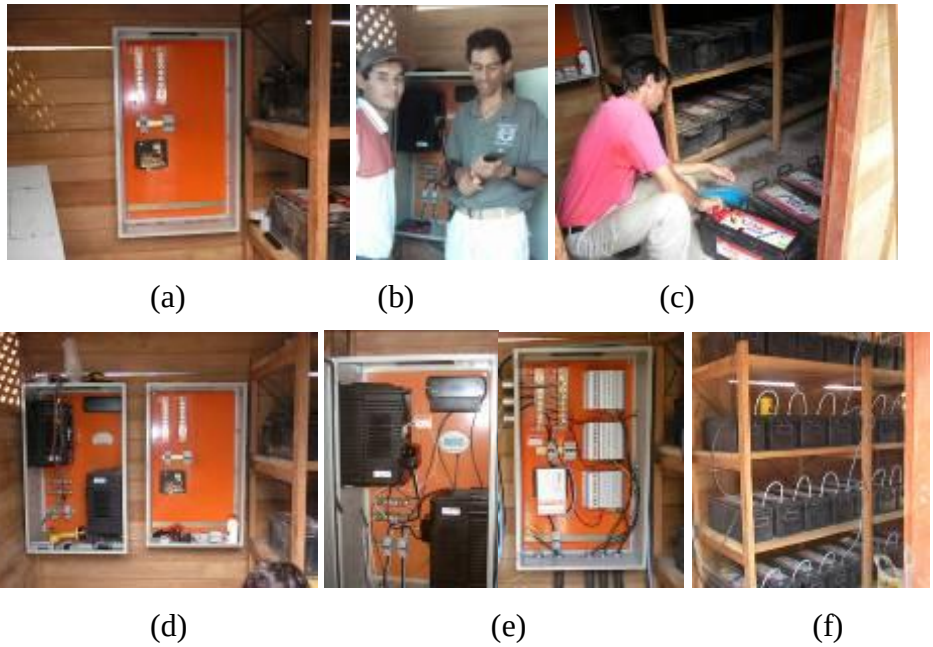
O abrigo para a eletrônica e casa de baterias foi construído ao lado do galpão da oficina comunitária (Fig. 10). Ele foi composto por uma casa de madeira pré-fabricada, onde a base foi feita de alvenaria.

Figura 10: Casa de Baterias e Equipamentos Eletrônicos do Sistema

A figura 11 mostra as turbinas eólicas instaladas. Elas foram instaladas em campo aberto, procurando seguir a direção predominante de vento, em torres de 12m de altura. Junto deles foi instalado um pára-raios. Foram instaladas cerca de 30 hastes de cobre com 3m de comprimento, foram instaladas desde o rio até o abrigo.

Figura 11: Turbinas Eólicas Instaladas

Instalação da eletrônica, figura 12. Os painéis foram instalados o abrigo considerando a parede que recebe menor quantidade de incidência solar durante o dia e de tal forma que a distância do banco de baterias fosse à mínima possível.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 12: Instalação da Eletrônica e Banco de Baterias no Abrigo

Foi instalada, também, uma bomba d´água com vazão de 500l/h a 700l/h. A figura 13 mostra esta seqüência.

Figura 13: Instalação da Bomba d'Água.

Um reservatório com capacidade de 2000L foi instalado para fornecer água aos processos produtivos desenvolvidos na oficina comunitária (Fig. 14)

(a) (b)

Figura 14: Reservatório de Água Instalado junto à Oficina Comunitária.

Foram instaladas seis lâmpadas de 11W cada de baixo consumo no galpão e uma na casa de baterias. Foram instaladas, também, quatro tomadas de três pontos. A figura 15 mostra uma das lâmpadas instaladas.

Figura 15: Luz de Baixo Consumo Instalada no Galpão

5.7.4 Instalação da Casa de Farinha

O projeto gerar foi até a comunidade para apoiar o projeto descrito anteriormente. No entanto, a equipe que estava no local desenvolvendo aquele projeto desapareceu e deixou a comunidade sem alternativa para utilizar a energia disponibilizada.

A equipe do projeto decidiu, então, instalar uma casa de farinha na comunidade disponibilizando algumas máquinas. A casa de farinha tem alguns componentes básicos: máquina de ralar mandioca elétrica, prensa manual e forno secador rotativo movido a motor elétrico.

Uma máquina de ralar mandioca com capacidade para 50kg/h A máquina de ralar mandioca já foi levada para a comunidade porque é pequena e leve. A figura 16 mostra dois membros da comunidade utilizando a máquina quando da sua chegada na comunidade.

Figura 16: Máquina de Ralar Mandioca Disponibilizada na Comunidade

Como se vê na figura 17 foi disponibilizado para a comunidade uma prensa manual retirada da umidade da massa de mandioca ralada, com capacidade de 1000kg/h.

Figura 17: Casa de Farinha em Operação. Destaque para Prensa e Máquina de Ralar Mandioca.

Um forno secador com misturador elétrico com capacidade de 1.300kg/dia foi disponibilizado na oficina comunitária.

5.7.5 Custo da Geração e Distribuição (kWh)

Os custos de O & M (Operação e Manutenção) foram compostos pelos custos de reposição das baterias, contribuição para o gestor, manutenção dos aerogeradores, substituição dos inversores após sua vida útil ou avaria e um fundo de reserva de 5% do valor dos custos de O & M, arrecadado para garantir eventualidades não previstas. A tabela 03 mostra esta composição.

Tabela 03: Cutos de O&M

Item	Previsão (anos)	Custo unitário (R$)	Qde	Custo total (R$)	Custo anual (R$)
Baterias	3	500	32	16000	5.333,33
Aerogeradores	5	150	3	450	90,00
Inversores	10	7000	2	14000	1.400,00
Subtotal I				**30450**	**6.823,33**
Contribuição para operador-gestor		50,00			600,0
Subtotal II					**7.423,33**
Fundo de reserva (5%)					371,17
Total anual					**7.794,50**
Contribuição mensal por família (10 famílias)					**64,95**

A tabela 04 mostra a potência e quantidade de energia gerada no sistema.

Tabela 04: Potência e Energia Gerada e Cada Tipo Mensal, Anual e Total

Item	Potencia (kW)	Horas/dia	Qde	Energia diária (kWh)	Operação mensal (dias)	Energia mensal (kWh/mês)	Energia anual (kWh/ano)
Placas solares	0,07	5	48	16,80	28,00	470,40	5644,80
Gerador eólico	1,00	4	3	12,00	28,00	336,00	4032,00
Totais	6,36			28,80	56,00	806,40	9676,80

O custo por kWh cobrado é obtido dividindo-se o custo anual total pela energia produzida anual. Assim:

Valor: R$ 0,805483 / kW/h

Este custo não inclui distribuição, já que a as residências não foram atendidas pelo projeto, somente o processo produtivo.

As residências não foram atendidas devido à grande dispersão o que acarretaria em perdas significativas de potência na rede.

5.7.6 Gestão do Sistema

Para se garantir que a energia será utilizada de forma equitativa ou proporcional por todos os membros da comunidade foi necessário implantar um sistema de gestão. A gestão é feita pela comunidade. A sugestão foi que a comunidade elegesse uma ou duas pessoas para serem treinadas para este fim. Estas pessoas além de fazerem a manutenção periódica do sistema, dentro das possibilidades também seriam responsáveis por gerir o uso da oficina garantindo que todos tivessem acesso a ela de forma equitativa.

Estes gestores são os responsáveis por levantar a tarifa de uso da energia da oficina comunitária. A forma de cobrança foi o sistema de rateio. Cada família terá o direito de usar a oficina e seus equipamentos seguindo uma escala determinada pelos gestores e cada família da comunidade contribuirá com uma parcela fixa mensal, aproximada de R$ 70,00 (setenta reais).

Estes gestores trabalhariam em sistema de escala semanal. Considerando que as horas de trabalho nesta ocupação é bem pequena estes gestores teriam tempo para cuidar dos seus negócios (pastoreio, plantio etc.) e receberiam, a título de contribuição, o valor de R$ 50,00 (cinqüenta reais) a ser descontado da sua contribuição para o uso da oficina, já que lês também são produtores. Periodicamente a comunidade pode trocar os gestores através de eleição.

Alternativamente a este sistema, havendo problemas de entendimento na comunidade, pode-se cobrar por tempo de uso da oficina comunitária. Havendo eventos envolvendo toda a comunidade, todos podem ser tarifados ou isentados a critério da própria comunidade, desde que a quantia necessária para a manutenção do sistema, principalmente reposição do Baco de baterias, seja acumulada ao logo do tempo necessário.

5.8 SUSTENTABILIDADE

5.8.1 Preço do Serviço X Capacidade de Pagamento

A comunidade tem, hoje, condições de arcar com os custos do serviço desde que utilizem a oficina para seus trabalhos e revendam no mercado o produto. A tabela 05 mostra as

possibilidades de utilização da oficina para a produção. Os valores apresentados são os praticados hoje para a venda aos turistas e no mercado das cidades e comunidades vizinhas.
Além da venda dos produtos listados na tabela 05, *in natura*, a comunidade pode implantar uma micro agroindústria para processamento das frutas extraídas bem como agregar valor a estes produtos pelo processamento. Polpa de frutas, compotas, geléias, e outros produtos artesanais podem ser acrescentados na gama de possibilidades, segundo o cronograma da tabela 06.

A partir de programas para pequenos produtores disponibilizados pelo governo federal, a comunidade pode adquirir equipamentos de refrigeração para conservação da matéria prima, bem como dos produtos processados. Como a energia disponibilizada é toda para a produção. O cronograma da tabela 06 mostra que durante todo o ano há matéria prima para coleta, plantio e processamento.

Tabela 05: Produtos de Plantio e Extrativismo possíveis de serem Processados na Oficina Comunitária

Material	**Unidade**	**Preço (R$)**	**Capacidade mínima de produção anual (kg)**	**Total (R$)**
Farinha	kg	5,00	200	1.000,00
Óleo de Piaçava	litro	20,00	20	400,00
Doce de Buturiti	quadro	4,00	50	200,00
Artesanato Capim Dourado	peça	10,00	100	1.000,00
Polpa de Manga	kg	10,00	100	1.000,00
Pequi in natura	saco	20,00	100	2.000,00
Doce pequi	quadro	4,00	30	120,00
Farinha de jatobá	kg	5,00	30	150,00
Artesanato jatobá	peça	5,00	10	50,00
Doce de caju	quadro	5,00	50	250,00
Castanha de caju	kg	20,00	30	600,00
Granulado de castanha do caju	kg	5,00	20	100,00
Farinha de castanha de caju	kg	3,00	20	60,00
Óleo de buriti	litro	10,00	30	300,00
Geléia de Cagaita	pote 300g	5,00	10	50,00
Doce de manga	pote 300g	5,00	30	150,00
TOTAL				7.430,00

Como se pode ver a comunidade tem total condição de ser auto-sustentável porque tem como aplicar a energia no processo produtivo e existe mercado para os produtos da comunidade.

Tabela 06: Matérias Primas a serem Utilizadas na Oficina de Produção. Ocorrência nos Meses do Ano.

Produto	Mês do ano											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Caju												
Jatobá												
Cagaita												
Manga												
Pequi												
Mandioca												
Coco piaçava												
Artesanato												

5.8.2 Impacto Sobre a Renda Local, Empregos Diretos e Indiretos a Partir da Implantação da Micro Usina

Conforme já apresentado, a renda média da comunidade era cerca de R$ 200,00/mês por família. Dividindo-se o valor total da tabela 05 por 12 meses pode-se ter um valor aproximado de R$ 600,00, adicionado ao valor atual a renda familiar aumenta para R$ 800,00/mês. Há que se considerar que os valores apresentados na tabela 05 representam a capacidade mínima de produção e processamento na oficina comunitária.

Outro aspecto a considerar é que a princípio não há aumento significativo no número de empregos diretos ou indiretos com a instalação da energia porque não se considera o responsável pela O&M e o gestor como empregos porque se está propondo que uma mesma pessoa assuma estas responsabilidades e que não tenha esta atividade como sua atividade principal, mesmo porque a remuneração é somente a título de contribuição. No entanto, aumentando a produção, alguém deverá ser responsável por fazer as negociações, transporte para os centros de comercialização, gerando empregos diretos e indiretos desta atividade. Por outro lado, membros da comunidade que, outrora, tinham tempo ocioso poderão utilizar a oficina comunitária para a produção e aumentar sua renda.

Outro aspecto a considerar é que alguns membros da comunidade têm deixado a região devido à falta de opção, principalmente os filhos e netos que estão tendo acesso à educação formal. A vida agropastoril não lhes parece atrativa porque não propicia acesso aos itens disponíveis nas cidades vizinhas (Mateiros e São Felix). Com a demanda produtiva, estes poderão permanecer na localidade e periodicamente dirigirem-se as cidades como opção de lazer ou de compras de outros produtos que não estão disponíveis na comunidade.

5.8.3 Análise de Viabilidade Econômica

Sob o ponto de vista social e tecnológico este tipo de sistema é totalmente replicável, no entanto sob o ponto de vista econômico nem sempre estes sistemas de geração isolados apresentam-se economicamente viáveis, apesar de ser uma solução quase obrigatória em certas circunstancias. Por tanto fazer uma análise, mesmo que rudimentar de viabilidade econômica se faz necessário para verificar em que situação este tipo de sistema pode ser replicado a contento. Foram adotados dois indicadores básicos VPL e Pay Back. A taxa mínima de atratividade (TMA) adotada foi à mesma que se pagaria em um financiamento em órgãos oficiais para implantação do sistema.

Em geral o BNDS ou BASA na região norte, que disponibiliza dinheiro para este tipo de aplicação apresenta taxas de juros atrativas, com valor médio de 6% a.a.
Considerando TMA=6%, valores cobrados pelo órgão financeiro oficial para este tipo de projeto e via útil de 30 anos, criaram-se os seguintes cenários:

- Cenário 1
  - **TMA = 6,0%**
  - **VPL = 0**
  - Recuperando capital investido
  - Payback=13,76 anos
  - Custo energia: R$ 1,86 /kWh
  - Contribuição por família=R$ 165,73
- Cenário 2
  - **TMA = 0,0%**
  - **VPL = 0**
  - Recuperando capital investido
  - Payback = 8,0 anos
  - Custo energia: R$ 1,17 /kWh
  - Contribuição por família=R$ 104,57
- Cenário 3
  - **TMA = 0,0%**
  - **VPL = 0**

- Capital inicial a fundo perdido
- Payback = 20 anos
- Custo energia: R$ R$ 0,805483 / kW/h
- Contribuição por família=R$ 64,95 mensais

Esta simples análise mostra que em qualquer situação o projeto é viável economicamente, no entanto, somente no cenário (c) uma comunidade aos moldes da apresentada neste caso terá condições de arcar com o preço do serviço de fornecimento de energia para o processo produtivo. Há que se analisar o custo da implantação de linha de distribuição convencional até estas comunidades.

5.8.4 Replicabilidade do Modelo de Geração

Este projeto é totalmente replicável desde que atenda algumas características fundamentais:

- Comunidade deve ser organizada e devidamente instruída;
- Incidência de vento com velocidade mínima de 6m/s e freqüência necessária. Neste caso, como quase 42 % da energia gerada vem dos aerogeradores, a disponibilidade de vento é fator crucial para o fornecimento da energia de projeto;
- Houver recursos para a produção local. Em geral todas as regiões do Brasil dispõem de recursos diversos para a produção. Uma das perguntas que comumente se fazem ao se falar do cerrado tocantinense é: "o que se produz lá? Só tem areia". No entanto, este trabalho mostrou que é possível tornar esta região produtiva. Levantar as disponibilidades, seja para atividade extrativista, seja para plantio ou pecuária, é fator primordial para viabilidade deste tipo de sistema. Deve-se considerar, no entanto, que devido à fragilidade do eco-sistema somente se recomenda culturas familiares;
- Houver incidência de energia solar necessária por pelo menos 4h/dia. Como 58% da energia gerada vêm dos painéis solares, regiões onde a incidência de sol seja inferior às 4h, a quantidade de energia que se pretende fornecer poderá ser comprometida, havendo a necessidade de se redimensionar o sistema, seja aumentando a quantidade de painéis solares, seja aumentando a potência ou número dos aerogeradores, seja o banco de baterias.

5.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do caso apresentado conclui-se que tecnicamente sistemas híbridos pode ser a solução para várias situações de comunidade isoladas, seja solar-eólico, sejam outras combinações, inclusive com diesel. No entanto, há que se pensar quais benefícios para as comunidades atendidas e na sustentabilidade do sistema, que deve prever os aspectos de implantação, operação e manutenção, além de ser concedido, preferencialmente, para atender a processos produtivos e educacionais.

Por fim, sob o ponto de vista financeiro, a energia hidrelétrica é imbatível, no entanto, devido ao alto impacto ambiental, a alternativa apresentada neste caso pode ser interessante se houver subsídios. Neste caso, o sistema foi implantado a partir de investimento do governo federal, no âmbito do Programa Luz para Todos. Mas outros programas semelhantes deveriam ser implantados para que todas as comunidades isoladas tivessem acesso à energia elétrica.

REFERÊNCIAS

MINISTÉRIO da AGRICULTURA: *Eletrificação rural no Brasil*; Editora do Ministério da Agricultura; Brasília; Brasil; 1984; p.93.

MINISTÉRIO das MINAS e ENERGIA. Portaria nº 447, de dezembro de 2004.

ROSAS, P. A. C.; ESTANQUEIRO, A. I. Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas. CBEE, 2002.

ROSSI, L. A. Sistema híbrido Eólico-Fotovoltáico: alternativa na geração descentralizada de eletricidade para áreas rurais isoladas **In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**, 3., 2000, Campinas. Proceedings online... Available from: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100024&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 08 de Março de 2009.

SANTOS, W. F.; ZUKOWSKI JR, J C. *Geração de energia descentralizada, alternativa para comunidades Isoladas no Estado do Tocantins.* In: Congresso Cientifico, 5 e Jornada Cientifica: Pesquisa Interdisciplinar, 7, 2007, Palmas , **Anais**... Palmas, 2007. p 48-51.

SANTOS, W.F.; ZUKOWSKI JR, J.C.; NOBREGA, S.L. de; MARÇON, R. O. A energia eólica como alternativa para comunidades isoladas na região norte do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28. 2009, Juazeiro (PA) /Petrolina (PE). **Anais...** Juazeiro (PA) /Petrolina (PE)., 2009. CD-ROM.

ZUKOWSKI JR, J.C.; MARÇON, R. O. Geração descentralizada de energia Aplicada ao processo produtivo de pequenas comunidades Agrícolas isoladas ln:lV congresso Cientifico e V Jornada cientifica: Ética & Ciência, 2005, Palmas, 2005.v.l.p.137-379.

ZUKOWSKI JR, J.C.; SANTOS, W.F.; MARÇON, R. O.; NOBREGA, S.L. de. A Disponibilização de energia elétrica através de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico em uma comunidade isolada na região do Jalapão, município de mateiros, estado do Tocantins. . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28. 2009, Juazeiro (PA) /Petrolina (PE). **Anais...** Juazeiro (PA) /Petrolina (PE). 2009. CD-ROM.

CAPITULO VI

POSSIBILIDADES TECNOLÓGICAS DE APROVEITAMENTO DA BIOMASSA PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

POSSIBILIDADES TECNOLÓGICAS DE APROVEITAMENTO DA BIOMASSA PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Aymara Gracielly Nogueira Colen Fritz[21]
Glecymara Sousa Gomes[21]
Maria Alzira Garcia de Freitas[21]
Maristhela Ramos da Silveira[21]
Yolanda Vieira De Abreu[22]

RESUMO

Esse capítulo apresenta as possibilidades tecnológicas de aproveitamento da biomassa para a produção de biocombustíveis. Em seu tempo geológico, a escassez do petróleo é previsível no curso de um século, estimulando assim pesquisas envolvendo fontes alternativas. Dentre essas fontes a biomassa tem se destacado para produção de biodiesel e etanol. O emprego das tecnologias de conversão da biomassa em formas de energias está concentrado em duas rotas principais: geração de energia elétrica e produção de combustíveis líquidos. Esse estudo tem como objetivo apontar as matérias-primas de cada região, mais adequada, segundo suas características e potencialidades quanto às condições edafoclimáticas, a produtividade e também o possível aproveitamento dos seus subprodutos, co-produtos ou resíduos que, dependendo das características físico-químicas, podem ser usados na indústria alimentícia, indústria química, indústria farmacêutica entre outros.

Palavras-chave: Biomassa; Tecnologias; Biocombustíveis.

6.1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e atividades econômicas demandam, de forma contínua e crescente, energia para responder às necessidades da sociedade moderna e sua forma de consumo. A energia pode ser produzida por fontes de origem fóssil e não renovável (petróleo e derivados, carvão mineral e outros), e não-fóssil denominada renovável ou alternativa, tais como hídrica, solar, eólica, geotérmica, biomassa e outras. Essa tem como finalidade fornecer bens e serviços como iluminação, cocção, conforto térmico das habitações (refrigeração e

[21]Mestrandas do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Agroenergia pela Universidade Federal do Tocantins. e-mail: aymetal@gmail.com; glecygomes@yahoo.com.br; garciafreitasmariaalzira@yahoo.com.br; maristhelars@hotmail.com.
[22]Professora do Programa de Pós-Graduação em Agroenergia pela Universidade Federal do Tocantins. e-mail: yolanda@uft.edu.br

calefação), transporte, motores, fornos e caldeiras para as atividades domésticas e empresariais e equipamentos tanto nas áreas urbana como rural.

A expansão da participação dos biocombustíveis na matriz energética brasileira é favorecida pelo aproveitamento dos recursos naturais com presença expressiva justificado pela posição geográfica, áreas disponíveis, condições edafoclimáticas além das técnicas agrícolas e do agronegócio já consolidado. Esta fonte não contribui para o acúmulo de gases do efeito estufa na atmosfera, porque o seu ciclo é auto-sustentável. Como os gases gerados na sua queima são reabsorvidos no crescimento da safra seguinte, há um equilíbrio entre a emissão e a absorção de poluentes. Além disso, os biocombustíveis que contém oxigênio em sua composição, como o etanol e o biodiesel, influenciam na redução das emissões de monóxido de carbono (CO) quando adicionados aos combustíveis fósseis. Os tipos de combustíveis renováveis para uso em transportes produzidos no Brasil são o álcool hidratado, álcool anidro e biodiesel.

Dentre os biocombustíveis, pode-se dizer que o desenvolvimento do etanol já está consolidado e que o biodiesel, ainda está em desenvolvimento, tanto no aspecto econômico e político quanto social. A cadeia de produção está intimamente relacionada com a cadeia da biomassa que apresenta rotas diversificadas das matérias primas utilizadas que vão desde os resíduos agrícolas, industriais, urbanos até as oleaginosas.

A conversão de energia química armazenada em combustíveis líquidos por processos industriais, por exemplo, fermenta açúcares de plantações de milho, trigo, beterraba ou cana-de-açúcar e converte-os em etanol, ou beneficia o óleo vegetal como pupunha, soja, mamona, dendê, babaçu, canola e amendoim para substituir o óleo diesel como fonte de energia.
No referido capítulo será abordado à importância do uso da biomassa, descrevendo as principais tecnologias convencionais e de seu aproveitamento para produção de bicombustíveis, geração de emprego e renda que poderá acarretar com o uso desta alternativa.

6.2 BIOMASSA

Do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica, tanto vegetal como animal, que pode ser utilizada na produção de energia (MARCONATO, 2008). Seu uso é cada vez mais crescente, visto que as reservas petrolíferas são cada vez mais escassas e estão localizadas em sua grande maioria nas regiões de conflitos geopolíticos.

A biomassa é originada das plantas aquáticas e terrestres, de óleos vegetais como a mamona, o dendê, o babaçu e o buriti. Origina também de alguns resíduos industriais como o de beneficiamento de grãos, de papel, madeireira, bebidas e alimentos, dentre outros. Resíduos urbanos como o lodo de esgoto e aterro sanitário são biomassas. Ela também é encontrada nos resíduos florestais e agropecuário (bagaço de cana-de-açúcar e esterco). Esses resíduos são usados como fontes alternativas de energia. Por sua vez, o Brasil é um produtor de expressão em produtos agrícolas que geram grandes quantidades de biomassa.

A agricultura de energia no país provém de quatro fontes principais de biomassa, sendo elas: as provenientes de cultivos ricos em carboidratos ou amiláceos, que geram o etanol; as de lipídios vegetais e animais, que geram o biodiesel; a madeira, que pode gerar o metanol, briquetes ou carvão vegetal; e os resíduos e dejetos da agropecuária e da agroindústria, que podem gerar calor e energia elétrica. Estes resíduos são constituídos basicamente das folhas e hastes das plantas, comumente chamados de palha, e têm um Poder Calorífico Inferior (PCI) médio em torno de 15,7 MJ/kg de matéria em base seca. A palha de arroz, palha de soja, o bagaço de cana são biomassas residuais do processamento industrial de extrema utilidade (NOGUEIRA e LORA, 2002).

A utilização da energia da biomassa é considerada estratégica para o futuro, pois é uma fonte renovável. No Brasil, em particular, mais de um quarto da energia usada tem origem vegetal. O Balanço Energético Nacional de 2004 registra que de um uso total de 213 Mtep (milhões de toneladas equivalentes de petróleo), 58 Mtep eram de biomassa vegetal, distribuídos em partes mais ou menos iguais entre a lenha e a cana-de-açúcar (BEN, 2008).
De acordo com a tecnologia empregada na sua utilização energética, KAREKESI *et al.,* (2005) têm classificado a biomassa em três categorias:

a) Tecnologias tradicionais de uso da biomassa ou biomassa tradicional: combustão direta de madeira, lenha, carvão vegetal, resíduos agrícolas, resíduos de animais e urbanos, para cocção, secagem e produção de carvão;

b)Tecnologias "aperfeiçoadas" de uso da biomassa ou biomassa "aperfeiçoada": tecnologias aperfeiçoadas e mais eficientes de combustão direta de biomassa, tais como fogões e fornos;

c)Tecnologias modernas de uso da biomassa ou biomassa moderna: tecnologias avançadas de conversão de biomassa em eletricidade e o uso de biocombustíveis.

Atualmente há preferência pela biomassa aperfeiçoada e moderna, pois apresenta uma melhor eficiência, visto que sua conversão é proveniente de tecnologias apropriadas para cada tipo de produto, tais como, energia elétrica, geração de calor e produção de biocombustíveis.

6.2.1 Disponibilidade e Consumo da Biomassa e Aproveitamento dos seus Resíduos para Produção de Biocombustíveis

Embora grande parte da biomassa seja de difícil contabilização, devido ao uso não-comercial, estima-se que, atualmente, ela possa representar até cerca de 14% de todo o consumo mundial de energia primária (ANEEL, 2008). Em alguns países em desenvolvimento, essa parcela pode aumentar para 34%, chegando a 60% na África como pode ser observado na tabela 01.

Tabela 01: Consumo da Biomassa em MtEP.

Consumo de Biomassa MtEP				
País ou Região	Biomassa [1]	Outros	Total [2]	[1/2]%
Mundial	930	5.713	6.643	14
China	206	649	855	24
Leste Asiático	106	316	422	25
Sul Asiático	235	188	423	56
América Latina	73	342	415	18
África	205	136	341	60
Países em Desenvolvimento	825	1.632	2.457	34
Países da OCDE	81	3.044	3.125	3

Fonte: Agência Internacional de Energia - AIE. Paris: IEA/OECD, 1998.

Atualmente, várias tecnologias de aproveitamento estão em fase de desenvolvimento e aplicação. Mesmo assim, estimativas da Agência Internacional de Energia (AIE) indicam que, futuramente, a biomassa ocupará uma menor proporção na matriz energética mundial – cerca de 11% em 2020 (AIE, 1998). Outros estudos indicam que, ao contrário da visão geral que se tem, o uso da biomassa deverá manter estável ou até mesmo aumentar, por duas razões:

a) crescimento populacional;

b) urbanização e melhoria nos padrões de vida (HALL; HOUSE; SCRASE, 2000).

Segundo o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2008) a quantidade estimada de biomassa existente na Terra é da ordem de 1,8 trilhões de toneladas, apesar de ser um número relativamente grande o potencial de aproveitamento de seu uso ainda é pouco explorado,

devido estar associada com países em desenvolvimento e com problemas de desflorestamento e desertificação. Entretanto, essa imagem da biomassa está deixando de ser uma alternativa em vanguarda devido às questões ambientais, pois com o uso das florestas energéticas plantadas, por exemplo, obtêm-se diversos serviços ambientais, e com o cultivo de uma determinada cultura energética que além da possibilidade de ser cultivada em áreas tidas como degradadas, inapropriadas para a agricultura extensiva.

Tem-se ainda outra vantagem ambiental no que concerne a emissões de dióxido de carbono (CO_2), pois com a realização da fotossíntese, promovida pelo cultivo dessas culturas bioenergéticas, estará ciclando CO_2 e liberando para a atmosfera o oxigênio (O_2), reduzindo desta forma o efeito estufa.

De acordo com BRASIL (1996) *apud* SOARES *et al.,* (2006), como vantagens econômicas dessas florestas podem ser citados que nos países em desenvolvimento, elas ainda são o combustível mais barato, tanto por tonelada quanto por unidade de calor; não necessita de mão-de-obra qualificada, gerando emprego e fixando o homem no campo; seu armazenamento é possível em espaço aberto, apesar do poder calorífico diminuir com o tempo; e apresenta baixo teor de cinza e enxofre.

Por outro lado, a lenha necessita de planejamento para sua utilização, devido ao controle das áreas florestais por instituições ambientais; exige grande contingente de mão-de-obra, elevando os custos nos países onde os salários são altos; e apresenta poder calorífico inferior ao dos combustíveis fósseis. Evidencia-se, assim, a importância da biomassa florestal como insumo energético seja na dimensão temporal, ou seja, na dimensão espacial.

O Brasil se destaca por ser um dos grandes produtores de etanol que é obtido da cana-de-açúcar (biomassa açucarada), apesar de existirem outras rotas tecnológicas para produção do etanol, como a biomassa amilácea (mandioca, batata) e a biomassa celulósica, que ambas estão em fase experimental. Tendo em vista que nos Estados Unidos, maior produtor de etanol, a sua rota tecnológica é através da biomassa amilácea, utilizando o milho como a matéria prima, apesar de estudos comprovarem seu balanço energético ser negativo.

Outra fonte de biomassa ainda não tão bem explorada é o lixo que possui elevada capacidade de produção de energia (captura de gás metano, produção de álcool, queima do biogás recuperado dos depósitos de lixo, a combustão de celulignina catalítica, a incineração ou a gaseificação). O potencial de energia disponível chega a 20% da oferta atual (ABES, 2007). Caso o "lixo" fosse realmente aproveitado ocorreria uma diminuição do montante de resíduos sólidos, que em vários centros urbanos é um problema de saúde pública, assim sua utilização é importante, pois diminui o nível de poluição ambiental; contenção do volume de lixo das cidades, nos aterros sanitários e em locais inadequados.

Diante do exposto a intensa produção da biomassa energética brasileira é através da cana-de-açúcar como matéria prima na produção de etanol, gerando desta forma o bagaço. O setor sucroalcooleiro, geralmente aproveita esse resíduo na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de co-geração, direcionando na rede elétrica o seu excedente para comercialização. Além disso, o período de colheita da cana-de-açúcar coincide com o de estiagem das principais bacias hidrográficas do parque hidrelétrico brasileiro, tornando a opção ainda mais vantajosa. Mas também existem outros tipos de biomassa como é o caso da produção de madeiras, em forma de lenha, carvão vegetal, que também geram uma grande quantidade de resíduos, podendo ser aproveitados para geração de energia elétrica, ou calor útil.

6.3 TECNOLOGIAS CONVENCIONAIS E BIOLÓGICAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL

O emprego das tecnologias de conversão da energia primária contida na biomassa em formas de energias secundárias está voltado para biomassa moderna, esse esforço é distribuído entre duas rotas principais: geração de energia elétrica e produção de combustíveis líquidos. Na primeira alternativa, é recomendável que se utilize o conceito de co-geração – produção de dois ou mais energéticos a partir de um único processo para geração de energia - tradicionalmente utilizada por setores industriais.

As rotas tecnológicas de conversão da biomassa em energéticos ou matéria prima podem ser agrupadas em três principais ramos fundamentais, dos quais derivam seqüencias bastante diversificadas de processos que dão origem aos produtos finais. Estes ramos fundamentais

estão classificados segundo a natureza dos processamentos primários aplicados à biomassa, e dividem-se em conversão termoquímica (quando a energia "quimicamente armazenada" na biomassa é convertida em calor por meio da combustão); conversão bioquímica (processos biológicos e químicos, que incluem a digestão anaeróbica, a fermentação/destilação e a hidrólise) e conversão físico-química (utiliza técnicas para disponibilização de lipídios através da compressão e esmagamento de matérias vegetais diversas e extração dos óleos vegetais, que posteriormente sofrerão transformação química), dentre outros como transesterificação, esterificação e craqueamento (VERINGA, 2000).

LORA e VENTURINI (2010) ainda enfatizam que as rotas tecnológicas para a fabricação dos biocombustíveis são geralmente classificadas em primeira, segunda e terceira geração. E comentam:

- Rotas de primeira geração (biodiesel, etanol e biogás, por vias convencionais). O biodiesel obtido a partir de óleos provenientes de plantas oleaginosas (colza, girassol, palma, rícino), utiliza processos tais como a transesterificação ou craqueamento para a conversão dos óleos vegetais em um combustível apto para motores;
- Rotas de segunda geração (produtos obtidos a partir de matérias-primas lignocelulósicas). Neste caso os biocombustíveis podem ser obtidos através de processos como a gaseificação e digestão anaeróbica. Nem todas as rotas de segunda geração, mostram os autores, está disponível comercialmente devido aos custos de produção ser ainda inviáveis, mas espera-se nos próximos anos que estas tecnologias atinjam a escala industrial. Ressaltam ainda que a principal vantagem desta rota seja a não utilização de alimentos como matérias-primas, como é o caso de vários processos da rota de primeira geração.

Nas tecnologias para a produção do biodiesel, existem processos alternativos (craqueamento, esterificação, transesterificação, dentre outros) que podem ser etílico (etanol) ou metílico (metanol). Atualmente a transesterificação etílica é o processo mais utilizado, graças à disponibilização do álcool, que além de uma logística pronta, tem também o incentivo do Governo. Ressaltando não caber a ele recomendar tecnologias porque as mesmas devem ser adaptadas a realidade de cada região brasileira, respeitando a diversidade ambiental, a cultura e a economia. Ao Governo cabe continuar estimulando o desenvolvimento tecnológico através dos convênios firmados entre o Ministério da Ciência e Tecnologia e as Fundações

Estaduais de amparo à pesquisa. Contribuindo para que se possa produzir o biodiesel com custos cada vez mais acessíveis, estimulando a competitividade, a exemplo do etanol.

Os principais processos observados na figura 01 para utilização das fontes de biomassa são:

1) Combustão direta: geralmente em caldeiras ou fornos;

2) Conversão biológica: por digestão anaeróbica bacteriana em um biogás rico em metano para ser usado como um combustível gasoso;

3) Conversão química ou bioquímica: produz etanol, metanol (combustíveis líquidos);

4) Gaseificação: processo de conversão físico química em um combustível gasoso, que provoca combustão a uma caldeira, máquina, até mesmo uma turbina.

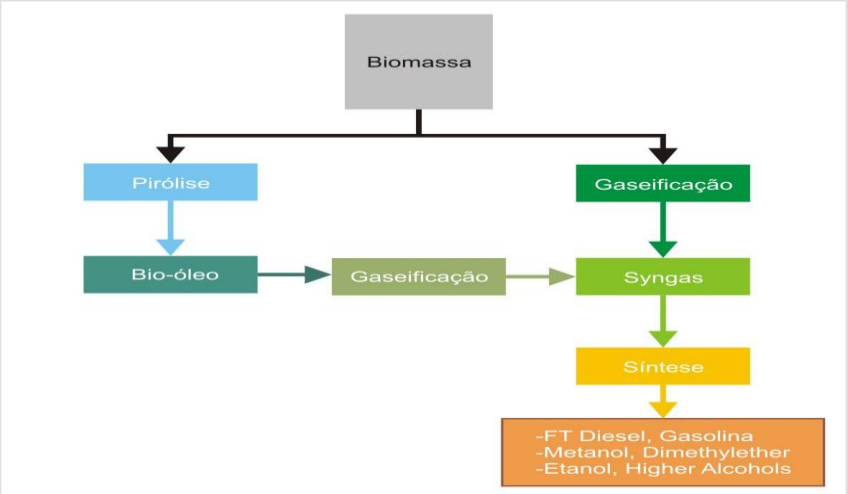


Figura 01: Principais processos para utilização da biomassa.

Através do cultivo da biomassa, ocorre a absorção do carbono da atmosfera que é liberado pela combustão e também na conversão para biocombustíveis. É importante que a sociedade e Governo conscientizem sobre os recursos da biomassa que são renováveis, mas somente se forem explorados na mesma proporção em que crescem e também preservando os nutrientes do solo para que não se esgotem (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY, 2006).

Dependendo da tecnologia utilizada para o aproveitamento da biomassa, ela pode ser transformada em eletricidade, calor e combustíveis. Na classificação da biomassa, algumas são difíceis, a exemplo de resíduos vegetais na etapa inicial de transformação em carvão vegetal e até mesmo os óleos vegetais que são produzidos a partir de produtos derivados de árvores (dendê). Existem métodos para a classificação da energia da biomassa que consideram

as rotas tecnológicas a serem adotadas para sua utilização ou seu nível de desenvolvimento tecnológico, como ocorre com as fontes de biomassas tradicionais e modernas (NOGUEIRA e LORA, 2003). Na figura 02, as fontes de biomassa são separadas em três principais grupos: vegetais não lenhosos; vegetais lenhosos; e resíduos orgânicos, que além de apresentar as principais fontes, apresenta também os principais processos de conversão da biomassa em energéticos (CENBIO, 2010).

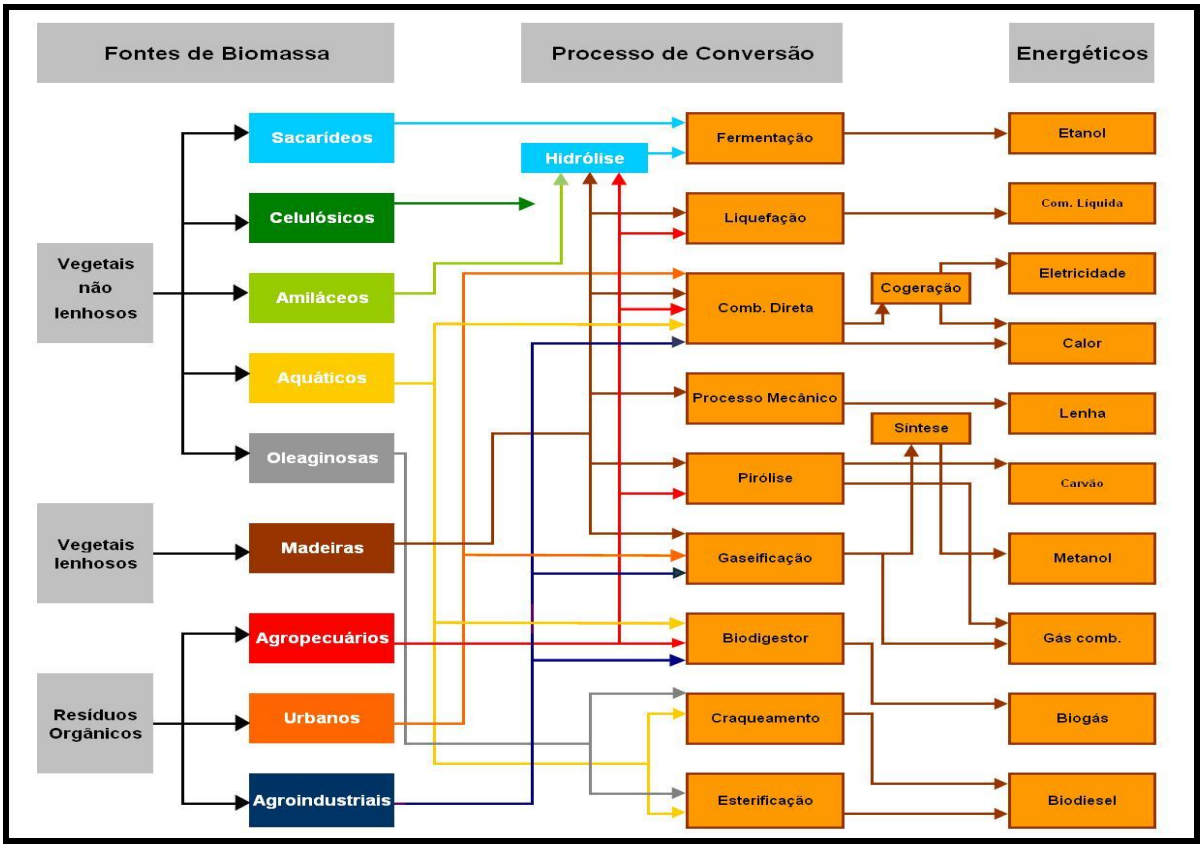


Figura 02: Fluxograma das fontes de biomassa, processos de conversão e em energéticos produzidos.
Fonte: Balanço Energético Nacional – BEN. Brasília: MME, 1982 adaptado por Cenbio, 2010.

Principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa:

6.3.1 Combustão Direta

Ocorre quando a energia química dos combustíveis é transformada em calor, através dos elementos fornecidos com os elementos constituintes. Ou seja, é a técnica mais comum de aproveitamento da biomassa, consiste na queima do material por aquecimento direto, tais como: fogões (cocção), caldeiras (geração de vapor) e fornos (metalurgia). Embora muito

prático e, às vezes, conveniente, o processo de combustão direta é normalmente muito ineficiente, sendo que a sua eficiência depende de vários fatores tais como, o combustível; o valor de umidade (20% ou mais no caso da lenha); o poder calorífico e a densidade energética do combustível, que é consideravelmente baixa como a lenha, a palha, os resíduos; além das dificuldades para transporte e armazenamento (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY, 2006).

Para biomassa sólida ser convertida em energia térmica útil, ela tem que se submeter à combustão. Apesar de existirem muitas tecnologias de combustão diferentes disponíveis, o princípio da combustão da biomassa é essencialmente a mesma para cada um, havendo três etapas principais:

a) secagem: toda a biomassa contém umidade, e esta umidade tem que ser expulsas antes da combustão;

b) pirólise: a biomassa seca é aquecida e quando a temperatura atinge entre 200º C e 350º C os gases voláteis são liberados. Esses gases se misturam com o oxigênio e queimam produzindo uma chama amarela. Este processo é auto-sustentável como o calor dos gases da combustão que é utilizado para secar o combustível fresco com a liberação de mais gases voláteis. O oxigênio deve ser fornecido para sustentar esta parte de combustão no processo. Quando todos os voláteis foram queimados, resta-se o carvão;

c) oxidação: à cerca de 800º C o carvão é oxidado. Novamente o oxigênio é necessário, tanto na cama de fogo para a oxidação do carbono e, por outro, em cima da cama de fogo onde se mistura com monóxido de carbono para formar o dióxido de carbono que é emitido para a atmosfera.

6.3.2 Pirólise ou Carbonização

A pirólise é um processo térmico que utiliza altas temperaturas para quebrar os resíduos, é o mais antigo e simples dos processos de conversão de um combustível sólido em outro de melhor qualidade e conteúdo energético (ATLAS, 2008). Este processo consiste no aquecimento do material original entre 300° C e 900° C, na "quase ausência" de ar, até a extração do material volátil. Obtém-se como resultado um gás combustível, produtos líquidos (alcatrão e ácido piro-lenhoso) e uma substância carbonosa que pode ser convertido em carvão ativado.

A pirólise pode ser dividida em pirólise lenta ou convencional e pirólise rápida, o processo tradicional de realizar-se a pirólise conhecido como pirólise lenta se caracteriza por realizar-se a baixas taxas de aquecimento (°C/s) e elevados tempos de residência (dependente do próprio processo). Este processo visa maximizar o rendimento de carvão vegetal, à custa de minimizar as quantidades de bio-óleo e gás.

A pirólise rápida é a realizada a elevadas taxas de aquecimento e pequenos tempos de residência das fases gasosas e sólidas no reator. Como resultados deste processo são produzidos, principalmente, vapores e aerossóis, além de certa quantidade de carvão vegetal (GOMÉZ *et al.*,2003).

A matéria orgânica passa por várias etapas no reator pirolítico: zona de secagem, com a temperatura variando de 100ºC a 150ºC. Zona de pirólise, onde irão ocorrer reações químicas como a fusão, volatilização e oxidação. Nessa etapa é que são retirados subprodutos, como alcoóis e alcatrão. Produtos como o bio-óleo são coletados na zona de resfriamento onde se encerra todo o processo. Existem vários modelos de reatores (Fig. 03) detentores das mais variadas tecnologias.

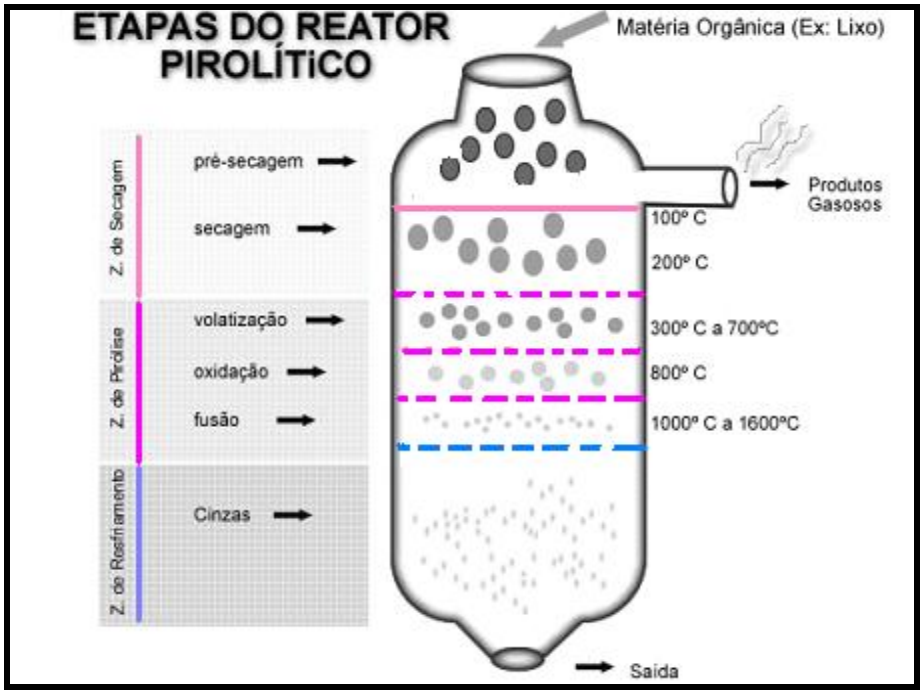


Figura 03: Etapas do Reator Pirolítico
Fonte: Adriano Leal, 2010.

A pirólise convencional é dirigida, especificamente, para a produção de carvão vegetal que tem uma densidade energética duas vezes superiores à do material de origem e queima em temperaturas muito mais elevadas. A relação entre a quantidade de lenha (material de origem) e a de carvão (principal combustível gerado) varia muito, de acordo com as características do processo e o teor de umidade do material de origem.

Em geral, são necessárias de quatro a dez toneladas de lenha para a produção de uma tonelada de carvão. Se o material volátil não for coletado, o custo relativo do carvão produzido fica em torno de dois terços daquele do material de origem (considerando o conteúdo energético). Embora necessite de tratamento prévio (redução da acidez), o líquido produzido pode ser usado como óleo combustível.

Nos processos de pirólise rápida, sob temperaturas entre 800° C e 900° C, cerca de 60% do material se transforma num gás rico em hidrogênio e monóxido de carbono (apenas 10% de carvão sólido), o que a torna uma tecnologia competitiva com a gaseificação. Todavia, a pirólise convencional (300° C a 500° C) ainda é a tecnologia mais atrativa, devido ao problema do tratamento dos resíduos, que são maiores nos processos com temperatura mais elevada. (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY, 2006).

Enquanto a pirólise rápida é considerado um processo avançado, no qual, cuidadosamente controlando os parâmetros de processo, podem ser obtidas elevadas quantidades de líquidos. Em nível de laboratório, o principal produto da pirólise rápida, o bio-óleo, é produzido em quantidades de até 80% (em peso de biomassa seca). Comumente os outros subprodutos deste processo, o carvão vegetal e o gás, são usados no próprio processo, de maneira que não existem fluxos residuais.

A pirólise pode ser empregada também no aproveitamento de resíduos vegetais, como subprodutos de processos agroindustriais. Nesse caso, é necessário que se faça a compactação dos resíduos, cuja matéria-prima é transformada em briquetes. Com a pirólise, os briquetes adquirem maiores teores de carbono e poder calorífico, podendo ser usados com maior eficiência na geração de calor e potência (CENBIO, 2010).

A pirólise e suas técnicas, com o avançar do tempo, também vivencia sua evolução onde ganha rendimentos cada vez mais satisfatório. Com os interesses voltados para o uso cada vez maior da biomassa para suprir o combustível fóssil, aumentando com isso os investimentos nas pesquisas para a produção do bio-óleo, onde a pirólise é perfeitamente viável. Estudos evidenciam que a pirólise além de ser um dos meios mais eficientes para o tratamento do lixo, é uma opção ecologicamente correta e possibilita a redução de aterros sanitários. Pois, em uma tonelada é possível extrair cerca de 11 quilos de sulfato de amônia, 12 litros de alcatrão, 9,5 litros de óleo, entre outros, portanto através da pirólise é possível extrair do lixo diversos subprodutos. (LEAL *apud,* SANNER, 1970).

6.3.3 Gaseificação

A gaseificação envolve a conversão de matéria carbonácea em produtos gasosos com valor de aquecimento adequado. É um processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas, onde a técnica mais comum é a oxidação parcial utilizando-se O_2, ar ou vapor quente para a produção de um gás (comumente denominado gás de síntese ou syngas) constituído de H e CO em duas proporções variadas (HIGMAN, 2003). Ou seja, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão). A matéria orgânica é total ou parcialmente transformada em gases cujos principais componentes são: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e, dependendo das condições, metano, hidrocarbonetos leves, nitrogênio e vapor de água em diferentes proporções. Esta tecnologia se encontra em estágio de desenvolvimento e comercialização, incluindo: tecnologias Fischer-Tropsch (GTL), para a produção de biodiesel ou biogasolina a partir da conversão do gás de síntese, tecnologias para a obtenção de biometanol com alto teor de alcoóis e alcoóis misturados como a mistura de gasolina ou substitutos, tecnologias desenvolvidas para fermentar o gás de síntese para etanol, com um co-produto do hidrogênio (LORA e VENTURINI, 2010).

O processo de gaseificação da biomassa resulta em complexas reações, ainda não bem conhecidas em sua totalidade. Porém, de forma introdutória e em termos teóricos, a Cenbio (2002) subdividiu em várias etapas:

1. Etapa de pirólise ou decomposição térmica, que se desenvolve a temperaturas próximas de 600º C.

2. Oxidação de parte do carbono fixo do combustível, método que constitui a fonte de energia térmica para o processo de volatilização e gaseificação.

3. Gaseificação propriamente dita, que inclui reações heterogêneas entre os gases e o coque residual, assim como reações homogêneas entre os produtos já formados.

4. Craqueamento do alcatrão – processo de destruição térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão com a obtenção de CO, CO_2, CH_4 e outros gases como produtos.

5. Oxidação parcial dos produtos da pirólise.

Dependendo da organização do processo de gaseificação (movimento relativo da biomassa e do gás de gaseificação), estas etapas transcorrem em diferentes regiões do gaseificador, ou em todo seu volume de maneira simultânea.

Existem vários tipos de gaseificadores, funcionando com grandes diferenças de temperatura e/ou pressão (Fig. 04). Os mais comuns são os reatores de leito fixo e de leito fluidizado. Os gaseificadores de leito fixo são simples e são os mais adequados para pequenas unidades. Os mesmos se classificam especialmente em contracorrente (Fig. 04a) e equicorrente (Fig. 04b) segundo as diferentes maneiras com que as etapas de gaseificação podem se suceder. No tipo contracorrente a biomassa geralmente entra por cima enquanto o ar entra por baixo. O gás combustível sai por cima e as cinzas da biomassa utilizada saem por baixo, caracterizando o fluxo contracorrente. Ao entrar no gaseificador o ar reage com o carvão vegetal formado logo acima, e produz gás carbônico e vapor d'água em altas temperaturas. Esses produtos são empurrados para cima e reagem endotermicamente com o carvão para formar CO e H_2. Esses gases ainda quentes fornecem o calor necessário para a pirólise e a secagem da biomassa que está entrando.

No gaseificador equicorrente a biomassa também entra por cima, mas o ar entra num ponto intermediário e desce no mesmo sentido da biomassa. Depois de passar pelo processo de redução, o ar sobe sem entrar em contato direto com a biomassa que está entrando, apenas troca calor para auxiliar o processo de pirólise. O ar entra na região de pirólise e produz uma chama queimando grande parte dos voláteis. Essa chama é conhecida como combustão pirolítica onde a quantidade limitada de ar produz gases combustíveis além de gás carbônico e

água. Quando os voláteis restantes são obrigados a passar pela zona de combustão, atingem temperaturas altas que os transforma em gases não condensáveis (WANDER, 2001).

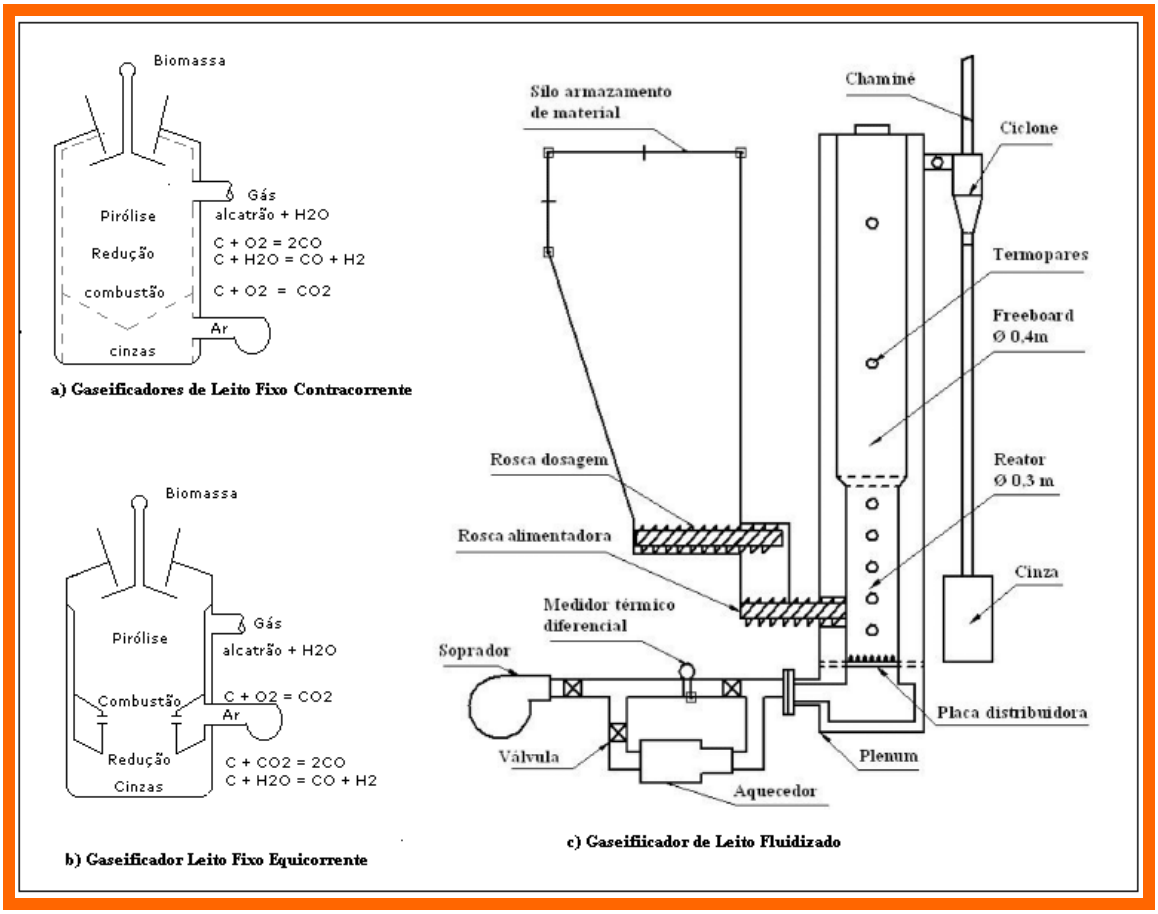


Figura 04: Desenho Esquemático de Tipos de Gaseificadores.

Após a zona de combustão a biomassa se transforma em carvão vegetal, o dióxido de carbono e o vapor d'água que vem da região de combustão reagem com esse carvão para gerar mais monóxido de carbono e hidrogênio. Esse processo resfria bastante o gás, já que as reações de redução são endotérmicas.

A gaseificação também pode utilizar a técnica da fluidização que é uma tecnologia adequada para converter diversos resíduos agrícolas em energia, devido a suas vantagens inerentes de flexibilidade de combustível, baixas temperaturas e condições isotérmicas de operação. A fluidização é uma operação em que um sólido entra em contato com um líquido ou um gás, de maneira tal que o conjunto adquire características similares às de fluidos, de modo que as taxas de transferência de massa e energia são elevadas. Desta forma um reator de leito

fluidizado consiste em uma câmara de reação que contém partículas suportadas por uma placa distribuidora e mantidas em suspensão por um fluido que as atravessa em sentido ascendente.

Angel *et al.,* (2009) estudaram a tecnologia de leito fluidizado com casca de arroz e obtiveram cinza amorfa a partir destas cascas com baixo teor de carbono não queimado em intervalos curtos de reação. A partir da combustão da biomassa das cascas foi gerado calor que pode ser utilizado em diversos processos industriais. A temperatura de combustão pode ser controlada com base na relação ar-combustível no reator de leito fluidizado e, por conseqüência, gerar resíduos com características distintas.

A gaseificação reúne algumas vantagens quanto ao seu uso:

a) As cinzas e o carbono residual permanecem no gaseificador, diminuindo assim a emissão de particulados;

b) Alta eficiência térmica, variando de 60% a 90%, dependendo do sistema implementado;

c) Associada a catalisadores, como alumínio e zinco, a gaseificação aumenta a produção de hidrogênio e de monóxido de carbono e diminui a produção de dióxido de carbono;

d) A demanda de energia pode ser controlada e, conseqüentemente, a taxa de gaseificação pode ser facilmente monitorada e, também, controlada.

Porém as desvantagens são:

a) A biomassa deverá ser limpa, sem a presença de terras ou outros elementos que possam comprometer o processo de gaseificação;

b) Há o potencial de fusão de cinzas, que poderá alterar o desempenho do gaseificador, quando se usa a biomassa com alto teor de cinzas, e

c) se não completamente queimado, o alcatrão, formado durante o processo de gaseificação, pode limitar suas aplicações.

A partir da gaseificação da biomassa ou de outros combustíveis sólidos é formado, segundo LORA *et al.*, (2008), o gás de síntese ou *syngas* que é uma mistura de gases de compostos químicos variados. Esse gás tem sua composição basicamente através de uma mistura de hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO) com aplicação em processos industriais de

produção de hidrogênio para células combustíveis, metanol e vários produtos químicos, como a amônia. Alguns autores diferenciam um gás de síntese de menor qualidade (baixo poder calorífico) passível de ser utilizado em motores de combustão interna alternativos, turbinas a gás ou para a queima direta em fornos e caldeiras. A poligeração consiste no uso do gás de gaseificação tanto para processos de síntese como para a geração de eletricidade em uma única planta. No caso da via bioquímica de conversão existe a opção de gaseificar os resíduos de lignina (LORA e VENTURINI, 2010).

6.3.4 Fermentação

É um processo biológico anaeróbio em que os açúcares de plantas como a batata, o milho, a beterraba e, principalmente, a cana-de-açúcar são convertidos em álcool, por meio da ação de microrganismos (usualmente leveduras). Em termos energéticos, o produto final, o álcool, é composto por etanol e, em menor proporção, metanol, e pode ser usado como combustível (puro ou adicionado à gasolina – até 25%) em motores de combustão interna.

A produção de bioetanol é efetuada em bases comerciais por duas rotas tecnológicas, utilizando matérias-primas doces, diretamente fermentáveis, como a cana-de-açúcar e a beterraba açucareira, ou matérias-primas amiláceas, como o milho e o trigo, cujo amido deve ser convertido em açúcares (sacarificado) antes da fermentação, observado na figura 05.

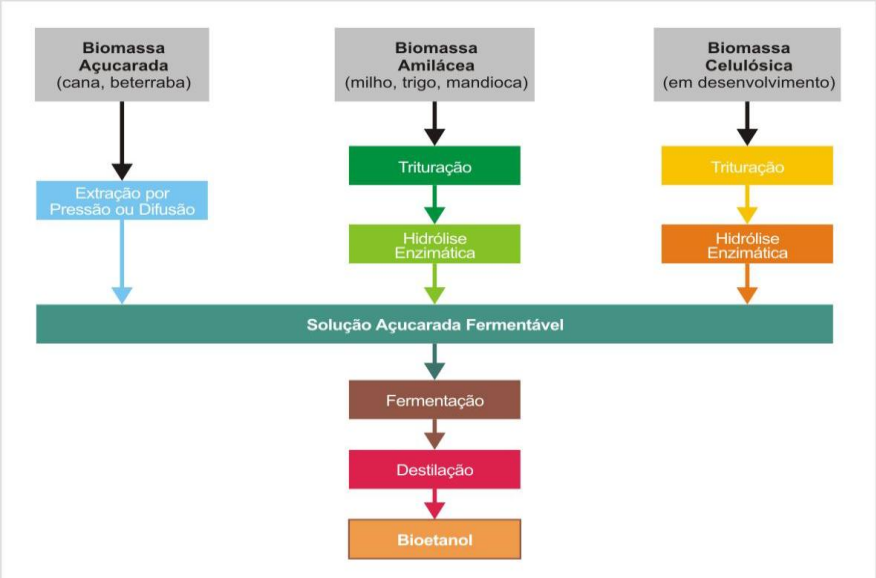


Figura 05: Rotas Tecnológicas do Bioetanol
Fonte: BNDS, 2008. (modificado)

Uma terceira rota, utilizando a biomassa disponível em materiais como o bagaço e a palha, hidrolisa as cadeias celulósicas e produz uma solução fermentável de açúcares, apresentando grande interesse graças ao baixo custo da matéria-prima. Contudo, essa rota de valorização energética da biomassa ainda não está disponível em escalas comerciais, embora haja expectativas de que nos próximos anos possa alcançar viabilidade econômica (BNDS, 2008).

6.3.5 Transesterificação

A transesterificação (Fig. 06) de óleos vegetais ou gordura animal (alcoólise) pode ocorrer através de várias rotas tecnológicas onde diferentes tipos de catalisadores podem ser usados: bases inorgânicas (hidróxidos de sódio e potássio e bases de Lewis), ácidos minerais (ácido sulfúrico), resinas de troca iônica (resinas catiônicas fortemente ácidas), argilominerais ativados, hidróxidos duplos lamelares, superácidos, superbases e enzimas lipolíticas (lipases) (SCHUCHARDT *et al.*, 1998).

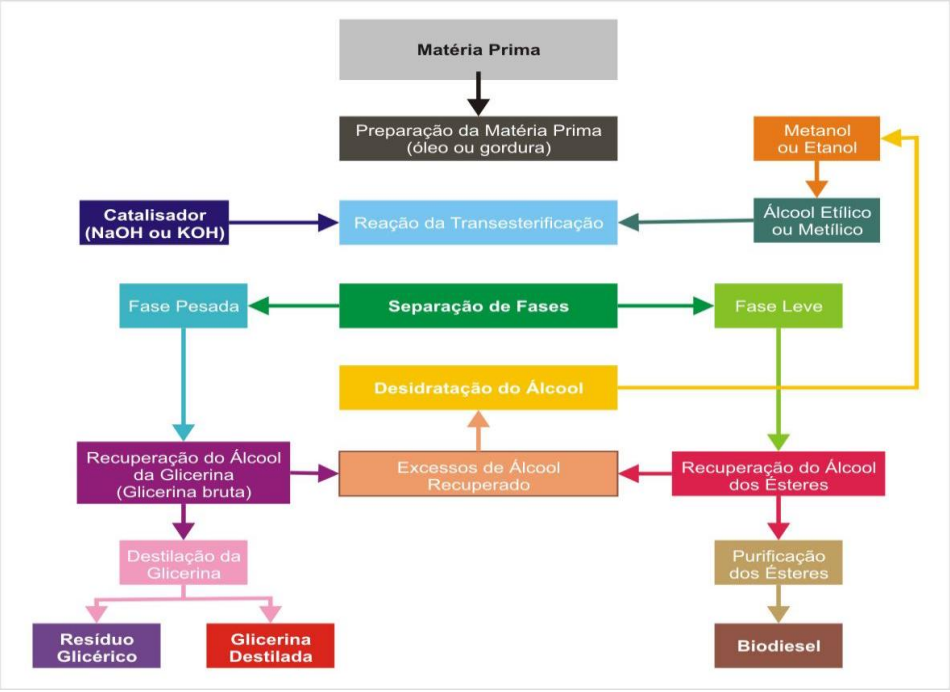


Figura 06: Processo de Produção do Biodiesel
Fonte: MAPA, 2006

Os produtos dessa reação química são a glicerina e uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos (biodiesel). A obtenção de uma fração glicerínica de teor mais puro é alcançada em algumas dessas rotas tecnológicas, em especial aquelas que fazem uso de catalisadores

heterogêneos, propiciando às mesmas, infiltrarem em um padrão de mercado mais expressivo. Mas, é correta a afirmativa que diz que ainda prevalece, a catálise homogênea em meio alcalino, por ser economicamente mais viável para a transesterificação de óleos vegetais (ZAGONEL e RAMOS, 2001).

O processo inicia-se com a preparação da matéria prima (Fig. 06), que pode ser tanto de origem animal quanto de origem vegetal e com a presença de catalisadores (NaOH, KOH) ocorre a reação de transesterificação, gerando duas fases, uma dita fase pesada e outra fase leve. Na primeira tem a recuperação do álcool da glicerina, passando por uma destilação, gerando desta forma o resíduo glicérico e a glicerina destilada. Já na fase leve, obtém-se o biodiesel através da purificação dos ésteres.

6.4 PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL

O Brasil detém liderança na geração e na implantação de tecnologias em agricultura tropical, acumulando conhecimentos e experiências em pesquisa, desenvolvimento, inovação e gestão de ciência e tecnologia. Além disso, possui capacidade material, humana e institucional instaladas, o que permite antever que se situa na fronteira da tecnologia para a agricultura de energia, da mesma forma na de alimentos. Paralelamente, o mercado doméstico de agroenergia é suficientemente grande para permitir ganhos de escala na produção e na absorção tecnológica, que o capacita a se tornar competitivo em escala internacional (MAPA, 2006).

Os atributos das matérias primas para a produção dos biocombustíveis são: aspectos agronômicos (teor de óleo e qualidade do farelo e torta, produção por unidade de área, ciclo da planta (sazonalidade), condições edafoclimáticas favoráveis, conhecimento do sistema de produção); aspectos tecnológicos (teor de ácidos graxos poliinsaturados, tipo e teor de ácidos graxos saturados, complexidade do processo de extração, presença de outros componentes no óleo, valor agregado de co-produtos); aspectos sociais (geração de emprego, melhoria da qualidade de vida das comunidades alvo, fixação do homem no campo); aspectos econômicos (geração de renda no campo, redução da importação de diesel, desenvolvimento da economia e liderança com maior autonomia de trâmites comerciais), e os aspectos ambientais (redução

das emissões de gás-carbônico e compostos de enxofre, associadas à queima de diesel, dentre outros (CRESTANA, 2005).

O álcool ganhou espaço no cenário internacional como combustível limpo e renovável. Neste campo, temos a experiência adquirida em mais de 30 anos em armazenamento, transporte, adição à gasolina e comercialização. O cultivo e o beneficiamento da cana são realizados em grandes e contínuas extensões e o aproveitamento de seus resíduos é facilitado pela centralização dos processos de produção. O Estado de São Paulo é o maior produtor nacional de cana-de-açúcar. Entre os demais estados, destacam-se Paraná e Pernambuco. A mistura do álcool na gasolina contribuiu ainda para que o Brasil fosse um dos primeiros países a eliminar o chumbo da gasolina.

Já para a produção do biodiesel, as vantagens são várias, dentre elas: estimar um novo mercado para as oleaginosas, possibilitando a geração de novos empregos em regiões carentes do país e aumentando o seu valor agregado com a sua transformação em biodiesel e proporcionar uma perspectiva de redução da emissão de poluentes. E ainda contribuir para a fabricação de lubrificantes de boa qualidade, aumentando o desempenho do motor. O mesmo possui baixo risco de explosão; não libera resíduos no motor; aceita misturas com o diesel, em quaisquer proporções, além de ser utilizado puro nos motores do ciclo diesel, sem a necessidade de adaptações e sua armazenagem e distribuição podem ser realizadas utilizando a mesma infra-estrutura que a do óleo diesel convencional (LEIRAS *et al.*, 2006).

A biomassa oferece também direcionamento adequado para os resíduos produzidos na fabricação do biodiesel, que, por meio do uso de biodigestores se produz o biogás, o resíduo gerado nesse processo ainda pode ser aproveitado como adubo orgânico e aplicado em áreas rurais (grandes propriedades e comunidades isoladas em todo o país). Outros tipos de resíduos como o lodo residual que é proveniente do tratamento de águas de esgoto urbano são considerados um desafio para engenharia sanitária e ambiental pela complexidade do processamento, volume gerado e disposição. Esse resíduo já está sendo aproveitado para produção de energia elétrica e termelétrica além de benefícios para área agrícola no manejo de solos. Vale à pena ressaltar que além dos dejetos e o esgoto serem usados por empresas de grande porte, as propriedades agrícolas e de criação de animais do oeste do Paraná, também utilizam para geração de energia movida a gás de aterros sanitários.

Os óleos residuais de frituras representam grande potencial de oferta. E um levantamento primário dos mesmos revela um potencial no país superior a 30 mil toneladas por ano. Algumas possíveis fontes dos óleos e gorduras residuais são: lanchonetes e cozinhas industriais, indústrias onde ocorre a fritura de produtos alimentícios, os esgotos municipais onde a nata sobrenadante é rica em matéria graxa, águas residuais de processos de indústrias alimentícias (SILVA *et al*., 2005).

Já Costa *et al*., (2007) dizem que o tempo de utilização do óleo varia de um estabelecimento para outro, principalmente pela falta de legislação que determine a troca do óleo usado. Por essa razão, considerando a grande diversidade de estabelecimentos que utilizam esses óleos, é difícil fazer um levantamento preciso da disponibilidade desse resíduo em grandes centros urbanos. E IVIG (2001) sugere que a conciliação do uso de insumos residuais, já disponíveis nos aglomerados urbanos, com insumos cultivados, seria uma opção para a produção de combustível para o transporte rodoviário urbano. Enfatiza ainda que nesse caso, é possível explorar o uso de óleos residuais de fritura como complemento à fabricação de biodiesel a partir de óleo de soja, que representa cerca de 90% da produção de óleos comestíveis no Brasil.

6.5 POTENCIALIDADES DAS MATÉRIAS PRIMAS POR REGIÃO

O Brasil por sua extensão territorial e sua localização geográfica possui características favoráveis para o cultivo de variadas culturas com potencial para produção de biocombustível. A figura 07 mostra as principais oleaginosas para produção de biocombustível por região brasileira.

O potencial brasileiro para produção de biocombustíveis se expande para o nordeste, onde, além da cana de açúcar, é possível cultivar mamona, amendoim, gergelim, babaçu, entre outras oleaginosas (PERES, 2006).

Segundo França (2008) a região Nordeste é uma área tradicional de produção de cana de açúcar e propicia a introdução de outras culturas energéticas, como exemplo, o pinhão manso que pode favorecer a integração lavoura-pecuária.

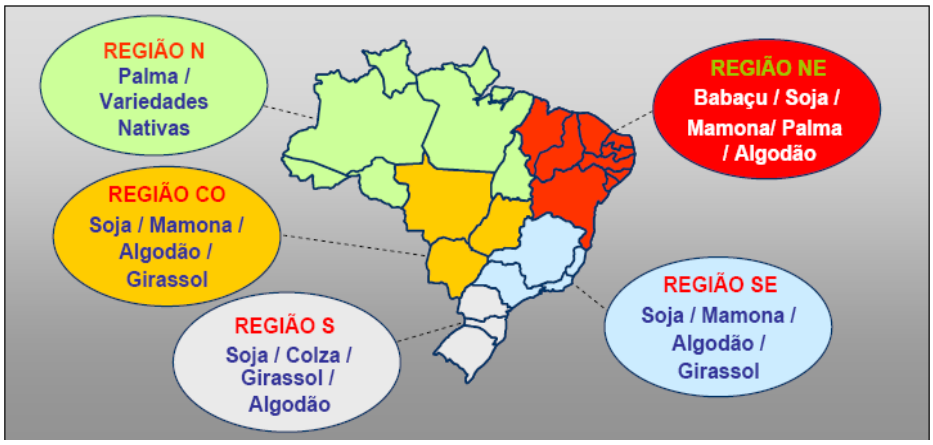

REGIÃO N
Palma / Variedades Nativas
REGIÃO NE
Babaçu / Soja / Mamona/ Palma / Algodão
REGIÃO CO
Soja / Mamona / Algodão / Girassol
REGIÃO SE
Soja / Mamona / Algodão / Girassol
REGIÃO S
Soja / Colza / Girassol / Algodão

Figura 07: Diversidade das Matérias Primas por Região
Fonte: ABIOVE, modificado por Frazão 2009.

No caso da mamona, para produção de biodiesel no Brasil é apresentada algumas limitações, tais como: o óleo obtido é considerado um produto nobre, o que encarece o processo; os resíduos gerados são tóxicos; e logística a ser desenvolvida para colheita. O uso da mamona foi largamente incentivado no Brasil para a produção de biodiesel. Porém, após ocorrer incentivos por parte do Governo Federal para a produção desta oleaginosa levando agricultores das mais variadas regiões do país a iniciar esse cultivo, percebeu-se que tanto o processo da produção do biodiesel era difícil, quanto à sua qualidade não era adequada com os parâmetros estabelecidos pela Agência Nacional de Petróleo, Biocombustíveis e Gás Natural (ANP), o que levou praticamente ao abandono do seu uso na indústria brasileira. Esta característica se deve porque o óleo de mamona apresenta um grupo hidroxila na cadeia carbônica do ácido ricinoléico, que compõe cerca de 90% do óleo de mamona. Tal característica química promove uma maior viscosidade e densidade ao óleo e ao biodiesel, não atendendo, portanto às propriedades desejadas do biocombustível (SUAREZ *et al*., 2009).

No Norte, o dendê se afigura como uma opção, pois existe mais de 50 milhões de hectares de áreas desmatadas, grande parte das quais com aptidão para o seu plantio. A região norte propicia o aproveitamento de espécies locais entre elas a palma e o babaçu; permite a recuperação de áreas degradadas; integração lavoura-pecuária-floresta; geração de energia elétrica em áreas remotas e de difícil acesso como é o caso da Amazônia; produção de energia para barcos e embarcações (FRANÇA, 2008).

Para as regiões Centro Oeste, Sudeste e Sul do Brasil, as matérias primas alternativas são a soja, o girassol, o algodão, cana-de-açúcar e a canola. Apresentando características

favoráveis para o seu aproveitamento, como: maior demanda e concentração da produção de álcool; melhoria da qualidade do ar das grandes cidades com a redução das emissões do diesel; aproveitamento local da soja e outras oleaginosas; integração lavoura-pecuária e redução do frete para o transporte do diesel das regiões litorâneas (FRANÇA, 2008).

Apesar de todo esse potencial, é necessário efetuar uma avaliação da capacidade de produção de oleaginosas no país, de acordo com a vocação regional, prevendo a expansão de áreas das oleaginosas com domínio tecnológico, bem como o incentivo ao cultivo de oleaginosas perenes, como é o caso do dendê. Com fulcro nas oleaginosas para produção de óleo diesel vegetal, podem-se derivar inúmeras outras oportunidades nas cadeias produtivas, gerando emprego e renda para esse segmento de agricultores (PERES, 2006).

6.5.1 Oleaginosas

6.5.1.1 Amendoim

O amendoim possui cerca de 50% de óleo na amêndoa e se constituiu em importante fonte de óleo comestível, antes de ser substituído pela soja. No Brasil, a produção de amendoim concentra-se nas regiões Sudeste - principalmente no estado de São Paulo, onde é cultivado em áreas de renovação de canaviais-, Centro-Oeste e Nordeste. Nessa última, a preferência é pelo tipo de porte ereto, por ser de ciclo curto, fácil manejo e ideal para a colheita manual. Tais características são importantes uma vez que a maioria do cultivo é procedida por pequenos produtores. Nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, os tipos rasteiros são preferidos por serem mais produtivos e, embora apresentem ciclo mais longo, é indicado para a colheita mecanizada, geralmente praticada por grandes produtores (PEREIRA *et al*., 2008).

6.5.1.2 Soja

A soja para produção de biodiesel é uma das mais adequadas, pois além da extensão de área e da escala de produção, a cadeia produtiva da soja é organizada, a ligação com o mercado internacional é estável, a formação de preços é bem definida e as possibilidades de acomodação de pressões de demanda, em função da capacidade de oferta brasileira, são otimistas. A cultura da soja possui cultivares com melhoramento genético apropriada para

cada região do país. Atualmente, em Mato Grosso do Sul a soja tem uma cadeia produtiva extremamente organizada e tradição consolidada, sendo produzidos aproximadamente 3,5 milhões de toneladas por ano. Entretanto, os preços nem sempre são competitivos, por constituir a principal fonte de óleo comestível no país (ROSCOE, 2006).

Por outro lado, o processamento de oleaginosas no segmento "grandes usinas" (acima de 100 mil ton/ano) superou a previsão de 80% do biodiesel (MAPA, 2005 *apud* SANTOS e WEHRMANN, 2007). Este segmento necessita grandes produções, padronizações e certezas para cobrir custos fixos. Isso mostra o caráter de mercado da agroenergia, e que o atendimento a demandas sociais do meio rural se limita a uma parcela apenas residual da atividade, de duvidosa capacidade de agregação continuada de renda e na ponta mais frágil da cadeia, concorrentes de *commodities*. Sobre essa questão, Viana e Wehrmann (2007) apresentam argumentos e dados da não-sustentabilidade ambiental (porque reduz apenas as emissões de enxofre, não altera NO_x, CO e CO_2 e eleva a perda da biodiversidade); social (pois dificulta a reforma agrária, concentra terra, provoca êxodo) e econômica (menos emprego que a agricultura familiar, concentra renda) da produção do biodiesel a partir da monocultura de soja. Os mesmo autores observam ainda que a tendência do biodiesel seja a formação de *commodity* e, nesse sentido, o setor sojicultor se sobressai pelas regras de mercado e por ter uma capacidade ociosa de esmagamento em torno de 40% da instalada (VIANA e WEHRMANN, 2007). Uma confirmação provisória da tese da *commodity*, discutida por Viana e Wehrmann (2007), aparece nos dados recentes da expansão das plantas industriais de processamento de matéria-prima e geração do biodiesel: a capacidade maior se desloca para o Centro-Sul do país e fica mais próxima da grande produção de soja, em Goiás, São Paulo, Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso (DORNELLES, 2006; BIODIESEL BRASIL, 2007; CARTA CAPITAL, 2007).

6.5.1.3 Dendê

O Brasil é, atualmente, o terceiro produtor de óleo de palma da América Latina, onde se destacam a Colômbia, em primeiro e o Equador, em segundo lugar. A participação do Brasil na produção mundial de óleo de palma tem sido de apenas 0,53% (MONTEIRO *et al.*,2009).

A região Amazônica dispõe de um diversificado campo de culturas oleaginosas promissoras para produção de biocombustíveis, dentre estas estão à cultura do dendê (*Elaeis guineensis Jacq.)*. *A* cultura do dendezeiro é a oleaginosa que mais produz óleo por área plantada, dentre as diversas oleaginosas mapeadas e existentes no Brasil. A cultura do dendê contribui para a fixação do homem no campo; constituem uma alternativa viável e rentável para a recuperação de áreas alteradas; é uma cultura extremamente versátil, sendo dela aproveitado os óleos da semente (óleo de palma) e do mesocarpo (óleo de palmiste), os cachos, os resíduos do processo de extração de óleo (glicerina), a torta utilizada como ração animal. No processamento dos frutos de dendê são produzidos resíduos sólidos que podem gerar energia térmica ou elétrica para a própria unidade industrial ou para uso nas comunidades rurais (MONTEIRO *et al*., 2009).

6.5.1.4 Girassol

O girassol (*Hilianthus annuus L*.) é uma planta anual, de origem peruana, conforme apontado pela maioria dos autores, embora alguns o consideram nativo da região compreendida entre o norte do México e o Estado de Nebraska, nos Estados Unidos. Embora o girassol esteja entre as principais oleaginosas produtoras de óleo vegetal comestível do mundo, sua produção atual, no Brasil, é inexpressiva (71 toneladas em 2002). Recentemente, a cultura foi re-introduzida nos Cerrados. No ano de 2003, o girassol foi cultivado como safrinha em cerca de 60 mil hectares, concentrados em Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás (PERES, 2006).

6.5.1.5 Babaçu

O babaçu é uma palmeira de tronco simples, robusto, imponente, com até 20m de altura; produz cachos que comportam até 400 frutos ou cocos, pesando cerca de 120g quando seco. É encontrado nos Estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Bahia, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Geras e Tocantins.

O óleo de babaçu, devido às suas características, poderá ser utilizado, após refinação, na confecção de comidas, chocolates, biscoitos, bolos, margarinas e manteigas vegetais, manufatura de sabonetes e sabões (em mistura com outras gorduras), na produção de estearina, manufatura de ácidos graxos como ácido láurico. A torta resultante da prensagem

do babaçu pode ser moída e servir para ração. Entre as palmeiras, o babaçu é um bom produtor de óleo e recentemente tem sido alvo de pesquisas para a fabricação de biocombustíveis como o biodiesel e o bioquerosene.

No que tange à produção de óleo combustível, o óleo de babaçu possui características excelentes para produção de biodiesel, devido sua composição ser predominantemente láurica. A composição para ácidos graxos é 6,0% de ácido caprílico, 5,0% de ácido cáprico, 44,0% de acido láurico, 17,0% de ácido mirístico, 8,0% de ácido palmítico, 4,5% de ácido esteárico, 14,0% de ácido oléico e 2,0% de ácido linoléico (BELTRÃO, 2007).
Apesar de tantas e tão variadas utilidades, por sua ocorrência não controlada do ponto de vista econômico e agrícola, o babaçu continua a ser tratado como um recurso marginal, permanecendo apenas como parte integrante dos sistemas tradicionais e de subsistência (PORTAL DO BIODIESEL, 2009).

6.5.1.6 Macaúba

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa das Florestas Tropicais. Apresenta grande dispersão no Brasil e em países vizinhos como Colômbia, Bolívia e Paraguai. No Brasil ocorrem povoamentos naturais em quase todo território, mas as maiores concentrações estão localizadas em Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, sendo amplamente espalhados pelas áreas de Cerrado (BHERING, 2009).

6.5.1.7 Microalgas

O aquecimento global é também atribuído ao alto nível de CO_2 na atmosfera. E com isso surge a necessidade de mudanças. Um dos principais focos para essa mudança está no uso de biocombustíveis. Em todo o planeta trabalha-se no desenvolvimento de alternativas economicamente viáveis para a fixação de CO_2, e os microorganismos fotossintéticos como as microalgas e cyanobacterias mostram ser fontes alternativas viáveis de energia limpa, pois para desenvolver a atividade vital que necessitam absorvem principalmente radiação solar, água e CO_2, como fonte de carbono, gerando assim, biomassa por meio da captura de CO_2 que pode ser utilizado em processos industriais. Azevedo *et al., apud* Benemann (2008) afirma que o uso de algas para a produção de biocombustíveis aconteceu em 1950. Em 1980 até

1995, O United States Department of Energy e o National Renewable Energy Laboratory (NREL), desenvolveram o Algae Species Program (ASP).

Várias pesquisas sobre microalgas, independente do uso energético, mostram a alta capacidade de produtividade tanto em biomassa, quanto em teor de óleo. Espécies selvagens potencialmente evidentes foram identificadas e caracterizadas em meados de fevereiro de 2008, e, através do seqüenciamento de alguns destes genomas foram obtidas microalgas geneticamente modificadas (AZEVEDO *et al., apud* MAYFIELD, 2008).

Possuindo um alto teor de óleo, o ultradenso de microalgas para ser usado em grande escala, necessita de inovações tecnológicas (as técnicas atuais são para cultivo em pequena escala) para obtenção de uma produtividade que além de satisfatória seja o óleo, obtido com melhor qualidade. É necessário também isolar e caracterizar mais estirpes, além de aprimoramentos genéticos em busca de características específicas. Também é primordial desenvolver novos métodos de aquicultura, e logísticas tais como: processos para colheita, extração e conversão do óleo. Como se pode observar existe muitos desafios para que ocorra a produção em alta escala. Vale à pena ressaltar que dependerá do interesse das instituições tanto pública quanto privada e também do fomento sobre essa fonte potencial para a bioenergia (AZEVEDO *et al.*, 2010).

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os biocombustíveis contribuem para a geração de renda no setor primário, redução de diversos tipos de poluição, desenvolvimento social e econômico, redução do inchaço das grandes cidades e favorecendo o ciclo da economia auto-sustentável essencial para a autonomia do país. Além da inovação da matriz energética que influencia na forma de consumo da sociedade e seus setores onde há o grande desafio de aproveitamento e reaproveitamento dos dejetos das atividades antrópicas; locação adequada e beneficiária de biomassa e seus dejetos; e agregação de valor ambiental (recursos naturais), econômico e social, o aproveitamento energético e racional da biomassa tende a promover o desenvolvimento de regiões menos favorecidas economicamente, por meio da criação de empregos e da geração de receita, reduzindo o problema do êxodo rural e a dependência externa de energia, em função da sua disponibilidade local. Porém, existem problemas, ainda

não resolvidos adequadamente, que podem limitar ou se tornar desfavoráveis à produção de oleaginosas para a produção do biodiesel, como desenvolvimento agronômico de sementes e processos, legislação adequada e realista em relação a incentivos referente à matéria-prima e investimentos em longo prazo. As rotas tecnológicas para produção do biodiesel e a difusão de como aproveitar os resíduos, depois de retirado o óleo, são itens que o produtor seja familiar, pequeno ou grande devem ter domínio.

REFERÊNCIAS

ABES Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - Disponível em: <<www. www.abes-dn.org.br/2007>> Acesso em: 10 de Janeiro de 2010 às 23h37min.

AIE, AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. Coal Industry Advisory Board: CIAB. Disponível em: <http://www.iea-coal.org.uk>> Acesso em: 10 de Março de 2002 às 08h15min.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica.; Atlas de energia elétrica do Brasil In: **Biomassa**. 3. ed. Brasília, DF; editora da Aneel; 2008; Cap. 04; p.63-74.

AZEVEDO, M. A.; D'AVIGNON, A.; ARAÚJO, M. A. V.; GODOY, S. C. **MICROALGAS: Fonte de energia para o Brasil?** Disponível em: <<http://www.facabiodiesel.com.br/biodiesel/ultrasom.htm>> Acesso em: 19 de Maio de 2010 às 13h30min.

BELTRÃO, N. E. M.; OLIVEIRA, M. I. P. **Oleaginosas Potenciais do Nordeste para a Produção de Biodiesel.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Algodão Campina Grande, PB. 2007. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/CNPA/21063/1/DOC177.pdf>>Acesso em: 31 de Março de 2010 às 21h30min.

BEN: **Balanço Energético Nacional 2009** – Ano base 2008: Resultados. Preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 2009.

BENEMANN, J. R., Overview: Algae Oil to Biofuels, National Renewable Energy Laboratory-Air Force Office of Scientific Research Workshop on Algal Oil for Jet Fuel Production – February, 2008.

BHERING, L. **Macaúba: Matéria prima Nativa com Potencial para a Produção de Biodiesel.** Embrapa Agroenergia (Brasília - DF). Disponível em: <<http://www.cnpae.embrapa.br/artigos-de-divulgacao/macauba-materia-prima-nativa-com-potencial-para-producao-de-biodiesel.pdf/view>> Acesso em: 19 de Março de 2010 às 17h30min.

BNDS, **Bioetanol de cana-de-açúcar: Energia para o Desenvolvimento Sustentável.** Organização BNDS E CGEE. 1° Ed. Rio de Janeiro – Novembro/2008.

CENBIO- Centro Nacional de Referência em Biomassa: **Estado da Arte da Gaseificação**. S. Paulo, p. 1-108, 2002.

CENBIO- Centro Nacional de Referência em Biomassa: **FONTES DE BIOMASSA.** Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/fontes.htm>> Acesso em: 19 de Maio de 2010 às 13h10min.

COSTA, N.; P. R.; Rossi, L.F.S. (2000) Produção de Biocombustível Alternativo ao Óleo Diesel através da Transesterificação de Óleo de Soja usado em Frituras**.** In**:** *Revista Química Nova*, Curitiba - PR, n.23, ano IV, p.531.

CRESTANA, S. **Matérias primas para Produção do Biodiesel: Priorizando Alternativas.** Embrapa. São Paulo, 2005. Disponível em: << www.apta.sp.gov.br/.../60_sbpc_biocombustiveis_novidades_inovacoes_geraldo_eugenio.pdf >> Acesso em: 17 de Janeiro de 2010 às 14h30min.
EMBRAPA/MAPA, 2005, Plano Nacional de Agroenergia 2006 - 2011, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, Brasília, DF.

FRANÇA, J.G.E.; **Biocombustíveis: Novidades e Inovações.** Campinas-SP. Julho/2008.

FRAZÃO, L.; **Aspectos ambientais relacionados à produção e uso dos biocombustíveis.** Piracicaba, São Paulo. Novembro-2009. Disponível em: << web.cena.usp.br/.../Aspectos%20ambientais%20biocombustíveis%20-Leidivan.pdf ->> Acesso em: 20 de Maio de 2010 às 20h52min.

GÓMEZ. E, O. *et al*., Projeto de Pirólise Rápida Contínua de Biomassa com Ar em Reator do leito Fluidizado Atmosférico. An 3. Enc. Energ. Meio Rural, 2003.

HALL, D. O.; HOUSE, J. I.; SCRASE, I. Overview of biomass energy. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. Industrial uses of biomass energy: the example of Brazil. London: Taylor & Francis, 2000. cap. 1.

HIGMAN C. and van der Burgt, M., "Gasification.", 1st edition, Gulf Professional. Disponível em: <<http://www.internationalrenewablesenergy.com/ index.php? pag=menu&idmenu=200>> Acesso em: 05 de Maio de 2010 às 10h00min.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Produção Agrícola Municipal - Cereais, Leguminosas e Oleaginosas 2005, Coordenação de Agropecuária - Diretoria de Pesquisas - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MP, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

Instituto Virtual Internacional De Mudanças Globais – IVIG. (2007). **Transesterificação de Óleo Comestível usado para a Produção de Biodiesel e Uso em Transportes**, 2001. Disponível em:<< http://www.ivig.coppe.ufrj.br/doc/cnpq1.pdf >> Acesso em: 31 de Outubto de 2007 às 08h43min.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY; Biomassa; Brasil; 2006. Disponível em: <<http://www.internationalrenewablesenergy.com/index.php?pag=menu&idmenu=200>> Acesso em: 24 de Maio de 2010 às 12h00min.

KAREKESI et al, 2005 Status of Biomass Energy in Developing Countries and Prospects for International Collaboration. In GFSE-5 Enhancing International Cooperation on Biomass. **Background Paper**. Austria, 2005.

LEAL, A.; Pirólise, item: **Reator Pirolítico**. Disponível em: << http://www.infoescola.com/reacoes-quimicas/pirolise/>> Acesso em: 05 de Maio de 2010 às 13h35min.

LEIRAS, A.; HAMACHER, S.; SCAVARDA, L. F. **Avaliação Econômica da Cadeia de Suprimentos do Biodiesel: Estudo de Caso da Dendeicultura na Bahia.** Bahia Análise & Dados Salvador, V. 16, N. 1, P. 119-131, JUN. 2006.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Termoquímica para Biocombustíveis;** Disponível em: <<http://xiiimet.cpatu.embrapa.br/arquivos/Termoquimica%20para%20Biocombustiveis%20-%20P1.pdf>> Acesso em: 18 de Maio de 2010 às 16h00min.

LORA, E. E. S.; CORAL, D. S. O.; ROCHA, M. H. **Rotas Termoquímica e Bioquímica para Biocombustíveis: estado-da-arte, Oportunidades e desafios para o brasil.** Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá/MG. Disponível em: <<lhttp://www.nipeunicamp.org.br/agrener/anais/2008/Artigos/23.pdf?3bc2dbeb0a7bf779fe39c865b70b3b3f=jlfqevwa>> Acesso em: 19 de Maio de 2010 às 12h55min.

MARCONATO, M.S.; SANTINI, G.A.; **Alternativas para a Geração de Energia Renovável no Brasil: a Opção pela Biomassa.** Julho-2008. Disponível em: <<www.ecodesenvolvimento.org.br/.../energias-alternativas...opcao-pela.../Energia-Renovavel-no-Brasil.-A-opcao-pela-Biomassa.pdf>> Acessado em: 18 de Março de 2010 às 15h25min.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – **MAPA.** Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011. Disponível em:<< www.mapa.gov.br>> Acesso em: 19 de Março de 2010 às 00h03min.

MONTEIRO, K. F. G.; ROCHA, E. C., PALHETA, R. P. **O Cultivo do Dendê (***Elaeis guineensis Jacq*.) **na Amazônia Paraense: Possibilidades de Geração de Emprego e Renda para Agricultores Familiares com a Produção de Biocombustíveis.** Disponível em: <<www.cpamn.embrapa.br/agrobioenergia/trabalhos/051.PDF>> Acesso em: 17 de Janeiro de 2010 às 13h00min.

NOGUEIRA, L. A. H., LORA, E. E., 2002, **Wood Energy: Principles and Applications, Núcleo de Excelência em Geração Termoelétrica Distribuída** – NEST, do Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, disponível em: <<http://www.nest.efei.br/portugues/Downloads/Files/Capitulo_1F.pdf> Acesso em: 28 de Junho de 2006 às 00h55min.

NOGUEIRA, L. A.; LORA, H. Dendroenergia: Fundamentos e aplicações, 2 ed, 2003

PEREIRA, J.W.L.; MELO FILHO, P.A.; SILVA, F.A.C; SANTOS, R.C. V**ariabilidade Genética de Acessos de Amendoim do Tipo Runner com Base em Marcadores Rapd.** Embrapa, 2008. Disponível em: <<http://www.cnpa.embrapa.br/rbof/fasciculos.php>> Acesso em: 19 de Março de 2010 às 03h10min.

PERES, J. R. R.; BELTRÃO, N. E. M. **Oleaginosas para biodiesel: situação atual e potencial. O Futuro da Indústria: Biodiesel.** Coletânea de Artigos. Brasília – DF. 2006. 145p. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/docs/ofuuturodaindustria%20-%20. Biodiesel.pdf.>> Acesso em: 17 de Janeiro de 2010 às 14h03min.

PORTAL DO BIODIESEL. **Babaçu.** Publications, Amsterdam, 2003. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/plantas/babacu/babacu.htm>>. Acesso em: 19 de Março de 2010 às 17h19min.

SCHUCHARDT, U., SERCHELI, R., VARGAS, R. M. Transesterification of Vegetable Oils: a Review. *Journal of Brazilian Chemical Society*, v.9, 1998.
SILVA, G. de S.; Moura, M. P.; Miranda, A. J. e Menezes C. A. (2005) III Workshop Brasil-Japão em Energia, Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável 23 e 24 de Novembro de 2005 – UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas - Auditório da Faculdade de Ciências Médicas, *Potencialidade da Produção de Biodiesel utilizando Óleos Vegetais e Gorduras Residuais*. Disponível em: <<http://www.rbb.ba.gov.br/arquivo/132.pdf>> Acesso em: 24 de Setembro de 2007 às 09h30min.

SOARES, T. S. *et al.*, Uso da Biomassa florestal na Geração de Energia. **Rev. Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**. Ano IV, n 08, p. 01-09, 2006.

SUAREZ, P. A. Z.; SANTOS, A. L. F.; RODRIGUES, J. P.; ALVES, M. B. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. Instituto de Química, Universidade de Brasília, CP 4478, 70910-970 Brasília – DF, Brasil Química Nova vol.32 n°.3 São Paulo, 2009.

VERINGA, H. J., 2000, **Advanced Techniques for Generation of Energy from Biomass and Waste, Energy research Centre of the Netherlands** – ECN. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/fleadmin/ecn/units/bio/Overig/pdf/Biomassa_voordelen.pdf.>> Acesso em: 03 de Julho de 2006 às 07h10min.

ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P. Produção de Biocombustível Alternativo ao Óleo Diesel através da Transesterificação de Óleos Vegetais. **Revista de Química Industrial**, v.717, 2001.

CAPÍTULO VII

BASES TECNOLÓGICAS DA OBTENÇÃO DE BIODIESEL

BASES TECNOLÓGICAS DA OBTENÇÃO DE BIODIESEL

Marco Antônio Baleeiro Alves[23]
Juan Carlos Valdés Serra[24]

"O ignorante afirma, o sábio duvida, o sensato reflete"

Aristóteles

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo mostrar a configuração da produção atual de biodiesel de maneira global, verificando as bases para aplicações tecnológicas industriais. Descreve os parâmetros de processos utilizados na produção de biodiesel em pequena/grande escala e aponta suas perspectivas tecnológicas.

Palavras-chave: Agroenergia; Tecnologia; Biodiesel.

7.1. INTRODUÇÃO

A reação de transesterificação é tida como uma maneira mais viável para se reduzir a viscosidade de óleos animais e vegetais refinados para uso energético. O produto principal obtido são os ésteres alquílicos, os quais se denominam biodiesel, o biocombustível propriamente dito, e como subproduto a glicerina, um álcool de três hidroxilas, que possui inúmeras aplicações.

O processo de obtenção de biodiesel é simples, porém depende do controle de suas variáveis e pode ser melhorado a partir do estudo e da otimização das mesmas. A composição química do óleo, o tipo de álcool empregado, o tipo e as quantidades de catalisadores utilizados, a temperatura e o tempo de reação têm sido as variáveis consideradas mais importantes. Na composição química do óleo bruto dois componentes são decisivos no processo: o índice de acidez e a presença de água. Ambos contribuem para a formação de reações de saponificação reduzindo o rendimento final.

[23] Mestrando em Agroenergia (UFT). E-mail: baleeiro@mail.uft.edu.br
[24] Professor do Mestrado em Agroenergia (UFT). E-mail: juancs@uft.edu.br

Óleos com alto índice de acidez podem passar por uma pré-transesterificação ou esterificação antes do início do processo, com o objetivo de assegurar uma maior porcentagem de conversão em biodiesel. Para resolver o problema da umidade, métodos de secagem a vácuo têm sido os mais promissores, somando-se aos cuidados no processo de extração, transporte e armazenamento dos óleos.

O álcool mais utilizado nesse processo tem sido o metanol, devido ao se menor custo relativo em países que produzem e consumem grandes quantidades de combustíveis fósseis. Contudo, o etanol desponta como uma possibilidade interessante, sob o ponto de vista econômico nos países que possuem aptidão agrícola para produzí-lo, uma vez que isso reduziria a dependência pelo petróleo, apresentando-se, dessa forma, como uma alternativa com menores impactos ambientais. Muitos estudos têm demonstrado que é possível produzir biodiesel pela via etílica obtendo-se altos rendimentos. As bases iônicas: hidróxido de potássio e hidróxido de sódio tem sido consideradas catalisadores convencionais, uma vez que apresentam alto rendimento. Estes são catalisadores homogêneos, os quais exigem uma purificação do biodiesel ao final do processo. No entanto, a via heterogênea tem sido apresentada como uma proposta economicamente favorável já que seria capaz de oferecer catalisadores eficientes e reutilizáveis, dispensando também processos de purificação do produto final.

Em suma, inúmeras são as propostas para o melhoramento da tecnologia de obtenção do biodiesel, talvez os maiores avanços fossem os processos que pudessem dispensar os processos de purificação do biodiesel, seja pela via homogênea, com um catalisador residual não agressivo ao motor e ao meio ambiente ou pela via heterogênea através de catalisadores imiscíveis. No entanto, para aplicações industriais, o tempo deverá ser cada vez menor, a partir do momento em que etapas extras sejam descartadas em função da otimização dos outros parâmetros.

7.2. TECNOLOGIAS DE OBTENÇÃO DE BIODIESEL: UMA REVISÃO.

7.2.1 Composição Química de Óleos Vegetais e Animais

Para um perfeito entendimento das tecnologias de obtenção de biodiesel faz-se necessário previamente, o conhecimento das composições químicas das matérias primas. Os óleos

vegetais e animais aparecem como as principais fontes de obtenção de biodiesel devido à presença da função éster na proporção de três partes para cada molécula de óleo (triglicerídeo), o que confere a possibilidade de reduzir a viscosidade através do processo conhecido como transesterificação. Além disso, a qualidade do biodiesel produzido depende enormemente da composição química dos óleos utilizados. Essa mesma composição deve variar de acordo com a origem do óleo vegetal, se é obtido a partir de resíduos de frituras ou de origem animal e ainda quanto ao tipo de oleaginosa e seus tratos culturais, condições de clima e adubação, além de outros fatores.

As composições químicas de óleos vegetais são muito semelhantes, de forma geral, os óleos vegetais brutos, segundo Ramos *et al*., (2003), apresentam grandes quantidades de substâncias como proteínas, fosfolipídios, ceras, carotenóides, produtos de auto-oxidação, cinzas e impurezas. Esses compostos podem dificultar o processo de transesterificacão e podem levar à formacão de produtos indesejados durante o processo de síntese. Basicamente existem duas grandes classes de componentes: os glicerídeos e os não-glicerídeos. Os glicerídeos, também conhecidos como triglicerídeos, ou triacilglicerídeos, são definidos quimicamente como ésteres de ácidos graxos e gliceróis. Essa nomenclatura indica que um triglicerídeo é formado de uma molécula de glicerol e até 3 moléculas de ácidos graxos que ao receberem um grupo alquila formam ésteres, como mostra a figura 01.

A estrutura molecular dos ésteres alquílicos (biodiesel) varia segundo as características estruturais dos triglicerídeos dos óleos vegetais (Fig. 01). O tamanho e o número de insaturações da cadeia carbônica são fatores determinantes de algumas propriedades do biodiesel. Como exemplo, observa-se que a elevação do número de cetano, do calor de combustão (medida do conteúdo energético) e dos pontos de fusão e de ebulição do combustível são reflexos do aumento no comprimento da cadeia carbônica dos ésteres. Já o aumento no número de insaturações ocasiona uma diminuição da estabilidade oxidativa, além de reduzir os valores de calor de combustão, do número de cetano e dos pontos de fusão e de ebulição. Mas, por outro lado, uma cadeia mais insaturada eleva a fluidez (parâmetro relacionado com a viscosidade e a cristalização) do combustível (SILVA, 2005).

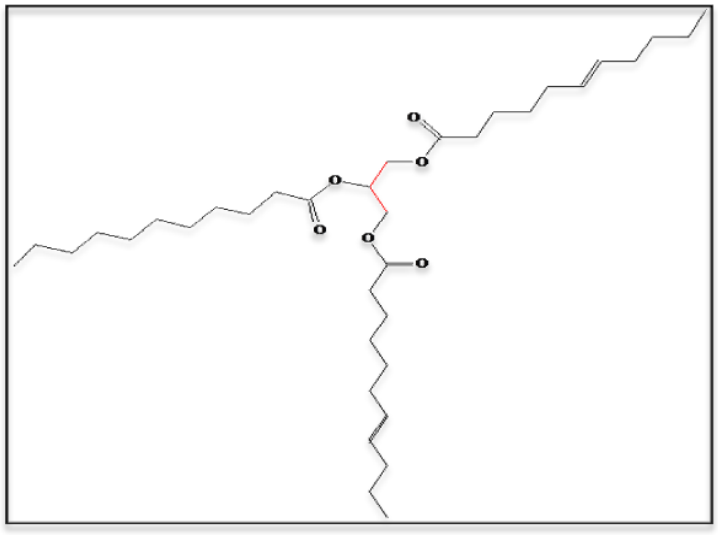


Figura 01: Molécula de um Triglideríde0 mostrando em Vermelho o Esqueleto Básico de Glicerol e as Três Cadeias de Ácidos Graxos.

Sobre a parte não-glicerídica, os ácidos graxos livres podem ser predominantes em muitos óleos, representando menos de 1% e até aproximadamente 30% (m/v) do óleo bruto. São compostos formados por uma cadeia carbônica de onde deriva a propriedade lipossolúvel e por um grupo carboxila terminal que provoca propriedades ácidas. Os ácidos graxos mais conhecidos são aqueles com comprimento de cadeia entre 12 e 22 átomos de carbono. Os mesmos reagem com as bases iônicas formando sabões, sendo um inconveniente para a produção de biodiesel (SILVA, 2006). Ainda no que se refere à parte não-glicerídica dos óleos vegetais, de acordo com Kucek (2004), temos um importante grupo: os fosfatídeos, os quais correspondem a moléculas de glicerol esterificadas com ácidos graxos e ácido fosfórico (H_3PO_4), os quais são exemplificados nas figuras 02, 03 e 04.

Observa-se pela tabela 01 que o teor de óleo da semente do Pinhão Manso supera o teor de óleo do grão de soja e da semente de algodão. Sabe-se que o valor econômico destas duas culturas é elevado e, dessa forma, constituem forte concorrência. O teor de proteína bruta do Pinhão Manso supera o do babaçu e o do girassol, já o extrato etéreo, que pode ser definido como sendo a totalidade de compostos apolares (lipossolúveis) existentes na torta, e que podem ser extraídos pelo solvente éter etílico, é comparável ao do linho, do algodão e amendoim, superando também, a soja e o algodão. Sendo assim, sabendo que o teor de extrato etéreo é bem próximo do teor de óleo extraído, a diferença entre estes dois parâmetros é pequena, então se pode concluir, que se trataria de um óleo com menos impurezas em relação

à parte não-glicerídica (esteróis, hidrocarbonetos, álcoois graxos e etc). Tem-se também, os tocoferóis, que são variações da estrutura molecular da vitamina E, e que podem fazer parte do extrato etéreo. Estes são componentes antioxidantes que conferem aos óleos brutos maior estabilidade à rancidez oxidativa, auxiliando na conservação e, consequentemente, no armazenamento dos óleos vegetais (MORETO e FETT, 1998). Não obstante, além destas importantes substâncias, também fará parte do extrato etéreo os ésteres de forbol, compostos aos quais são atribuídas atualmente as propriedades tóxicas do óleo de *Jatropha curcas L.*, tendo como principal representante nesta espécie o 12-deoxi-16-hidroxiforbol-13-acilato (MAKKAR *et al*., 1997).

Tabela 01: Características de Algumas Oleaginosas em Termos de Potencial de Óleo Extraído, Proteína Bruta e Extrato Etéreo.

Espécie	**Material**	**Óleo (%)**	**Proteína bruta**	**Extrato etéreo**
Pinhão-manso	Semente	32-35	21,71	32,58
Babaçu	Amêndoa	65-68	8,57	53,80
Amendoim	Semente	54-56	33,05	38,81
Gergelim	Semente	44-58	38-40	50-52
Girassol	Semente	40-45	15,94	48,39
Canola/Colza	Semente	38-48	24-27	-
Linho	Semente	33-43	26,79	32,88
Nabo forrageiro	Semente	32-40	29,57	30,77
Soja	Grão	18-20	42,10	20
Algodão	Semente	18-20	22,47	22,93

Fonte: BIODIESELBR, 2009.

Um estudo de Teixeira (1987) constatou que, para *Jatropha curcas L*., há diferenças quanto ao teor e composição do óleo em função da localidade, tratos culturais e variedades. Pode-se observar que, segundo este autor, o teor de óleo na semente variou de 23 a 34%, os quais são próximos dos resultados da tabela 01, de 32 a 35% de óleo na semente (BIODIESELBR, 2009).

Para comprovar estas variações, pode-se comparar os dados obtidos do estudo de Rao *et al*., (2008) que revelou o teor de óleo encontrado nas sementes de *Jatropha curcas L.* uma média de 32%, com uma composição de 97,6% de triacilgliceróis, 0,95% de glicolipídeos e 1,45%

de fosfolipídios. A fração de fosfolipídeos foi caracterizada e quantificada sendo: fosfatidil colina 60,5%, fosfatidil inositol 24% e fosfatidil etanolamina 15,5%.

A figura 02 mostra a estrutura da fosfatidilcolina, os grupos representados por R são ácidos carboxílicos de 12 a 22 átomos de carbono e podem conter insaturações. Observa-se a presença do nitrogênio ligado a quatro carbonos o que lhe confere uma carga positiva gerando uma estrutura instável podendo, dessa forma, gerar impurezas e odores indesejáveis.

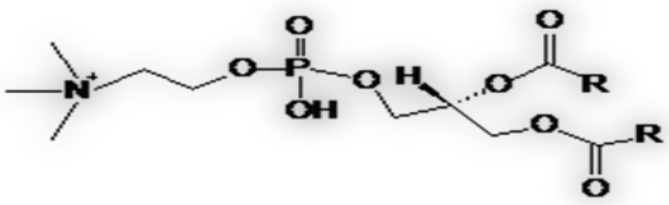


Figura 02: Estrutura da Fosfatidilcolina.
Fonte: MERTINS *et al.*, 2008

Em todas estas moléculas existem regiões polares e apolares. Quando a região polar é hidratada os fosfatídeos se insolubilizam no óleo, nessa condição são facilmente removidos, é o que caracteriza o princípio dos métodos de degomagem (MORETO e FETT, 1998). Na fosfatidilcolina, as moléculas de água se ligam ao nitrogênio quaternário positivo (Fig. 02).

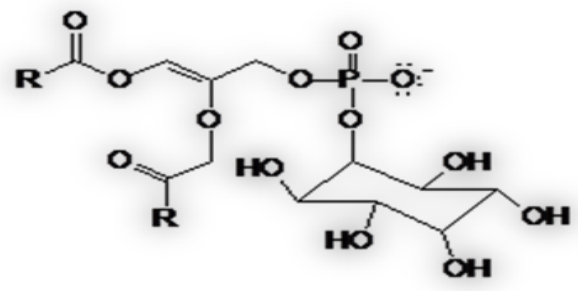


Figura 03: Estrutura do Fosfatil Inositol.
Fonte: VISÃO BIOQUÍMICA, 2009.

O grupo fosfato e a molécula do açúcar (hexose), ambos representados na figura 03, na molécula do fosfatidil inositol, representam a parte polar da estrutura como um todo. A maior parte da fração de fosfatídeos do óleo de soja é representada por fosfatidil inositol (40%), seguido das cefalinas (31%) e lecitinas (20%). Todos esses componentes podem ser aproveitados pela indústria de alimentos para a produção de emulsificantes em sorvetes, chocolates, margarinas e outros. A fosfatidil etanolamina (Fig. 4) possui o grupo etanolamina ligado ao grupo fosfato, o que a difere do fosfatidil inositol. Isso lhe confere alguma

polaridade e propriedades emulsificantes. Devido a estas propriedades os fosfatídeos podem dificultar a separação do biodiesel e da glicerina (MORETO e FETT, 1998).

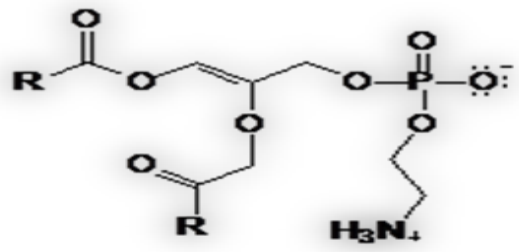


Figura 04: Estrutura do Fosfatil Etanolamina.
Fonte: VISÃO BIOQUÍMCA, 2009

A tabela 02 mostra as principais composições em termos de ácidos graxos que podem estar presentes na estrutura dos triacilgliceróis. Contudo, é preciso considerar que esta composição química é variável, podendo mudar em função do período de colheita, adubação, clima, época de plantio, e tratos culturais. Observa-se por esta tabela, que a maior parte do óleo de pinhão manso é constituído de ésteres os quais possuem alguma insaturação, sendo os isômeros cis-oleato e trans-oleato predominantes, representando 40,3%, cada um com 18 carbonos e 1 dupla ligação (18:1) e linoleato com 18 carbonos e 2 duplas ligações (18:2), representando 37%. Dessa forma, este se assemelha ao óleo de amendoim quanto ao teor de oleatos (cis e trans). Também se assemelha ao óleo de soja quanto ao teor de palmitato, estearato, oleatos e linoelatos. Devido aos baixos teores de glicerídeos saturados, o índice de saponificação do óleo de *Jatropha curcas L.* possui valores próximos a todos os óleos da tabela 02 com exceção apenas do óleo de coco e de babaçu.

Como afirma Moretto e Fett, (1998), a maioria dos ácidos graxos saturados (com mais de 12 carbonos) apresenta maiores pontos de fusão em relação aos ácidos graxos insaturados (18 a 20 carbonos). Isto está diretamente ligado à proporção de grupos alquílicos saturados presentes nos triglicerídeos. As gorduras de coco e de babaçu, assim como as gorduras animais (sebo e manteiga), contém quantidades de grupos alquílcos saturados maiores do que a de insaturados, conferindo pontos de fusão maiores que 20°C. Sabe-se ainda que a viscosidade aumenta a medida em que aumentam o comprimento das cadeias dos triglicerídeos e diminui quando aumenta a insaturação.

A diferença marcante entre óleos de origem animal e os de origem vegetal está no fato de que os primeiros possuem alto teor de ésteres saturados, possuindo, dessa forma baixos valores de índice de iodo. Como mostra a tabela 02, isso parece favorecer a altos valores de índice de saponificação, sendo um bom indicativo de qualidade. No entanto, estes altos índices de saturação conduzem a altas temperaturas de congelamento, o que levaria a possíveis problemas de entupimento dos bicos injetores dos motores. Sendo assim, de acordo com Moretto e Fett, (1998), a resolução número 20/77 do CNNPA (Conselho Nacional de Normas e Padrões para Alimentos), define um ponto de fusão de 20°C como temperatura limite, classificando como gordura animal quando o ponto de fusão situa-se acima desse valor e como óleos quando o ponto de fusão situa-se abaixo desse valor.

Os óleos de fritura constituem-se de uma fonte importante de matéria prima para a fabricação de biodiesel, uma vez que esse tipo de reaproveitamento não só retiraria do meio ambiente um poluente, mas também permitiria a geração de uma fonte alternativa de energia. Entretanto, estes óleos são submetidos a temperaturas da ordem de 180 a 200°C, o que acarreta a sua degradação térmica por duas vias principais: a rancidez hidrolítica em que a reação do grupo funcional éster com água gera ácidos graxos e a rancindez oxidativa, na qual as ligações duplas reagem com o oxigênio do ar formando monômeros cíclicos e não cíclicos, hidrocarbonetos poliaromáticos, aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e outros compostos de alta massa molecular, os quais podem ser cancerígenos, irritantes gastrointestinas e destruidores de vitaminas.

Contudo, estes compostos indesejáveis não inviabilizam a utilização dos óleos de fritura para a produção de biodiesel quando os parâmetros físico-químicos tais como teor de acidez, índice de peróxidos e índice de saponificação são devidamente monitorados e corrigidos através de procedimentos de filtração simples e pré-transesterificação usando bicarbonato de sódio e metanol, ou pela via ácida, usando ácido clorídrico e metanol, com o objetivo de reduzir a acidez e torná-lo apto para a produção de ésteres alquílicos de boa qualidade.

Tabela 02: Índice de Iodo, Índice de Saponificação e Composição em Ácidos Graxos de Alguns Óleos Vegetais.

Óleo	Índice de iodo	Índice de saponificação	Composição em ácidos graxos (% m/m)									
			8:0	10:0	12:0	14:0	16:0 Palmitato	18:0 Estereato	18:1 Cis-oleato e Trans-oleato	18:2 Linoleato	18:3 Linolenato	22:1
Pinhão manso	15,12 [4]	133,4 [4]-185,75 [3]	-	-	-	1,4 [1]	16,4 [2]	5,4 [2]	40,3 [2]	37 [2]	-	-
Babaçu	10-18	245-256	2,6-7,3	1,2-7,6	40-45	11 – 27	5,2 – 11	1,8-7,4	9 – 20	1,4-6,6	-	-
Amendoim	80-106	187-196	-	-	-	0 - 0,5	6 – 14	1,9-6	36,4 - 67,1	13-43	-	0-0,3
Coco	6-12	248-265	4,6-9,5	4,5-9,7	44-51	13 – 20	7,5- 10,5	1 - 3,5	5 - 8,2	1,0-2,6	0-0,2	-
Milho	103-140	187-198	-	-	-	0 - 0,3	7 – 16,5	1 - 3,3	20 - 43	39-62,5	0,5-1,5	-
Algodão	90-119	189-198	-	-	-	0,6 – 1,5	21,4-26,4	2,1 - 5,0	14,7 - 21,7	46,7-58,2		
Gergelim	104-120	187-195	-	-	-	-	7,2 – 9,2	5,8 - 7,7	35 - 46	35 - 48	-	-
Soja	117-143	189-194	-	-	-	-	2,3 - 13,3	2,4-6	17,7-30,8	49-57,1	2-10,5	0-0,3
Girassol	110-143	186-194	-	-	-	-	3,5-7,6	1,3-6,5	14-43	44-74	-	-
Sebo bovino	35-48 [6]	190-202 [6]	-	-	-	3,1 [6]	30 [5]	20-25 [5]	45 [5]	0,9 [6]	-	-

Fonte: KNOTHE *et al.*, 2004 (modificado); [1] KUMAR e SHARMA, 2008; [2]PERES *et al.*, 2008;[3]ARAÚJO *et al.*, 2007; [4]PENHA *et al.*, 2007; [5]MOURA *et al.*, 2006; [6]BELLAVER & ZANOTTO, 2004.

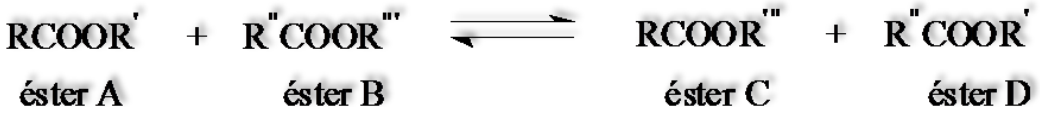
7.2.2 A Reação de Transesterificação

O termo biodiesel foi utilizado pela primeira vez em um artigo escrito por Wang R. em 1988, cujo título era: *Development of Biodiesel Fuel*. Sendo assim, por motivos históricos, apenas a transesterificação leva ao produto comumente denominado de biodiesel, apesar de existirem outros métodos de redução da viscosidade dos óleos vegetais e animais, tais como uso de misturas binárias com diesel, pirólise, microemulsificação - ou mistura co-solvente (KNOTHE *et al*., 2006).

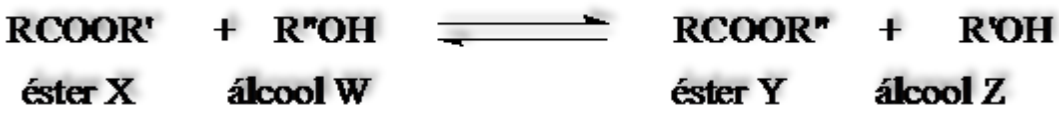
Alguns autores costumam utilizar o termo transesterificação de forma genérica referindo-se a alcoólise e esterificação, como se fossem sinônimos. Outros, por sua vez, usam o termo "reações de interesterificação" em similaridade ao termo alemão "*Umesterung"*. A rigor, a troca do grupo acil e alquil entre dois ésteres é denominada interesterificação, do inglês, "*ester interchange.*"

A interesterificação pode ser classificada como uma reação de dupla troca onde, a partir de dois ésteres A e B diferentes, é possível permutar o grupo acil de A para B e trocar o grupo alquil B para A formando dois ésteres diferentes C e D, como descreve a equação seguinte:

- Equação representativa da reação de interesterificação.



- Reação de alcoólise ou transesterificação.

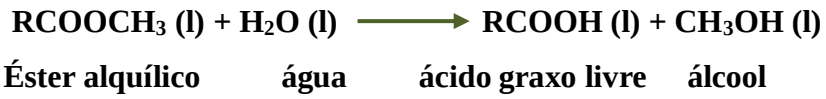


O presente trabalho trata do processo de obtenção do biodiesel, determinado pela reação de transesterificação que pode ser definida como sendo: a reação entre 3 moléculas de álcool e 1 molécula de triglicerídeo (triéster) produzindo 3 moléculas de ésteres alquílicos e uma de glicerina (KNOTHE *et al*., 2006).

De acordo com Zagonel *et al.,* (2000), o óleo a ser usado para a obtenção de biodiesel deveria

estar isento de umidade e com uma acidez abaixo de 2mg KOH/g de óleo. Isso porque a água presente no meio reacional facilitaria a formação de sabões, como é mostrado nas equações a seguir, e os ácidos graxos livres presentes reagiriam em meio alcalino promovendo as reações de saponificação.

- Equação química mostrando a reação de hidrólise, etapa que antecede a reação de saponificação:



- Equação química representando a reação de saponificação.

Teoricamente, a transesterificação do óleo vegetal ocorre por uma reação reversível, em que um éster é transformado em outro pela mudança na porção alcóxi, cuja otimização depende de fatores como a razão molar álcool/óleo, a concentração e o tipo de catalisador, a acidez da matéria prima, a temperatura, pressão e tempo de reação, a agitação do meio reacional e o índice de umidade presente no óleo. Contudo, durante a produção de ésteres alquílicos de óleos vegetais a reação reversa é consideravelmente negligenciável porque o glicerol formado na reação não é miscível no produto, levando a um sistema de duas fases. Com isso, do ponto de vista termodinâmico, a freqüência de colisões entre as moléculas dos produtos é reduzida drasticamente, inviabilizando a reação reversa (DORADO *et al*., 2004). No processo de transesterificação as reações (ou etapas) que ocorrem são as seguintes:

- Triglicerídeo (TG) adicionado ao álcool (ROH) formando diglicerídeo (DG) e monoéster de biodiesel (RCO_2R).

- Diglicerídeo (DG) na presença de um álcool (ROH) formando monoglicerídeo e monoéster de biodiesel (RCO_2R):

- Monoglicerídeo (MG) na presença de um álcool (ROH) formando glicerina (GL) e monoéster de biodiesel (RCO_2R):

Como pode ser exemplificado pelas etapas descritas acima, diacilgliceróis (DG) e monoacilgliceróis (MG) podem ser considerados intermediários durante a reação de transesterificação. Dessa forma, a concentração de vários tipos de glicerídeos e a concentração máxima que estes intermediários podem variar de reação para reação, depende das condições em que a transesterificação é realizada, as quais podem ser minimizadas (KNOTHE *et al.*, 2006).

A figura 05 representa genericamente a reação de transesterificação. A proporção de triglicerídeo e álcool é de 1:3, entretanto, será necessário um excesso de álcool para o deslocamento do equilíbrio químico na direção de maior formação de produtos (FREEDMAN *et al.*, 1984; MEHER *et al.*, 2006; SHARMA *et al.*, 2008). O catalisador pode ser um ácido ou uma base. Pela relação molar dos reagentes, nota-se que o peso molecular de uma molécula típica de éster é geralmente 1/3 da massa molar de uma molécula de óleo de soja, e, portanto, tem uma viscosidade muito menor (SANCHEZ, 1990).

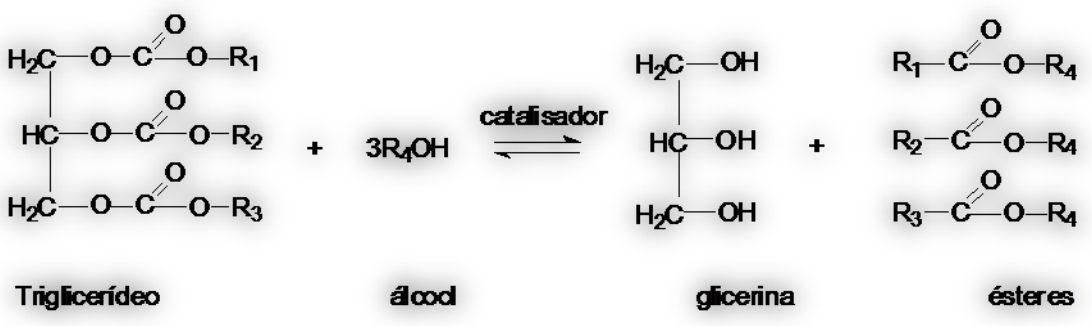


Figura 05: Reação de Transesterificação

7.2.3 O Uso de Álcoois e Co-solventes

No processo de obtenção de biodiesel sempre será necessário a utilização de um álcool, sendo que o metanol é o mais utilizado mundialmente, devido principalmente ao menor custo. Nos EUA o metanol chega a ser 50% mais barato que o etanol. No entanto, em algumas regiões, mais notadamente no Brasil, a disponibilidade de matéria prima e tecnologia permitem a produção economicamente viável de etanol por processos fermentativos, resultando em um álcool mais barato que o metanol. Alguns estudos já foram realizados usando vários alcoóis de até 8 carbonos, segundo Darnoko e Cherian (2000) *apud* KUCEK (2004); Barnwal e Sharma (2004) *apud* KUCEK (2004) como é exemplificado pela tabela 03.

Tabela 03: Comparação entre Algumas Propriedades de Álcoois de Diferentes Massas

	Fórmula	**Massa molar ($g.mol^{-1}$)**	**Ponto de ebulição (°C)**	**Ponto de fusão (°C)**	**Densidade ($g.mL^{-1}$)**
Metanol	CH_3OH	32,42	65	- 93,9	0,7914
Etanol	C_2H_5OH	46,069	78,5	- 117,3	0,7893
1-propanol	$CH_2OH\text{-}CH_2\text{-}CH_3$	60,096	97,4	-126,5	0,8035
2-propanol (iso-propanol)	$CH_3\text{-}CHOH\text{-}CH_3$	60,096	82,4	- 89,5	0,7855
1-Butanol (n-butanol)	$CH_2\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}OH$	74,123	117,2	- 89,5	0,8098
2-Butanol	$CH_3\text{-}CHOH\text{-}CH_2\text{-}CH_3$	74,123	99,5	-	0,8080
2-Metil-1-propanol	$CH_2OH\text{-}CH(CH_3)\text{-}CH_2\text{-}CH_3$	74,123	108	-	0,8018
2-Metil-2-propanol	$CH_3\text{-}COH(CH_3)\text{-}CH_3$	74,123	82,3	25,5	0,7887

Fonte: KNOTHE *et al.*, 2006

As propriedades destes alcoóis são determinantes das propriedades dos ésteres etílicos formados na transesterificação. Como mostra a tabela 03, a massa molar dos alcoóis atingem valores de no máximo 74,123 $g.mol^{-1}$. Dessa forma, estima-se que não será apropriado um maior valor, uma vez que é diretamente proporcional à temperatura de ebulição do mesmo. Sendo assim, um maior ponto de ebulição torna o reaproveitamento do álcool por destilação do biodiesel um processo de maior custo. A densidade também é um fator importante, que sendo uma função da massa molar e das interações intermoleculares, nota-se pela tabela 03

que varia de no mínimo 0,7855 e no máximo 0,8098g.mL^{-1}, o que tornaria esses álcoois mais apropriados para atender as especificações estabelecidas pelas normas nacionais e internacionais. Também já foi demonstrado que os ésteres derivados destes álcoois oferecem a vantagem de exibir pontos de congelamento inferiores aos observados nos ésteres metílicos correspondentes (KNOTHE *et al*., 2006).

7.2.4 Métodos de Obtenção de Biodiesel

Os parâmetros que influem no rendimento e na velocidade no processo de obtenção de biodiesel são: tipo de catalisador, proporção molar entre álcool e óleo, temperatura, tempo de reação, grau de refino do óleo vegetal empregado, efeito da presença de umidade, nível de agitação do sistema e teor de ácidos graxos livres. Segundo Knothe *et al*., (2006) a condição padrão para a transesterificação metílica tem se definido com os parâmetros: temperatura de 60°C, razão molar álcool: óleo de 6:1 e tempo de reação de 1 hora. Outros alcoóis têm exigido temperaturas mais altas, no caso do etanol: 75°C.

A maioria dos estudos tem demonstrado resultados não necessariamente condizentes, sendo realizados com variáveis independentes as quais podem ser diferentes ou não. No caso do trabalho de Kucek (2004) usando um excesso considerável de etanol (1:12) obteve rendimentos de 97,2%, a 70°C usando 0,3% de hidróxido de sódio (NaOH). Já com hidróxido de potássio (KOH) foi possível reduzir em 40% a formação de sabões em proporção óleo/etanol de 1:12, também a 70°C com 1% do catalisador. De acordo com Brandão *et al*., (2005), as melhores condições reacionais para a obtenção do biodiesel etílico de babaçu são: relação óleo/etanol 1:9,45, teor de KOH de 2,0%, 60 min e a 30ºC, com um teor de ésteres de 98,23%, acima do estabelecido pela norma européia prEN 1403 e rendimento de biodiesel em massa de 80,69 %. Comparando-se estes trabalhos é possível concluir que o uso de KOH, em menores concentrações (em torno de 1%) e maior excesso de etanol a temperaturas mais baixas, menores que 70°C, tendem a melhorar o rendimento. Observa-se ainda pelo trabalho de Faccio (2004), que para atingir conversão máxima de 96,2% de ésteres etílicos, usando óleo de mamona, foi necessário utilizar maior temperatura (70°C), razão molar óleo/etanol (1:9) e maior teor de catalisador: 1,5% de NaOH, mostrando que o tipo de óleo pode ser uma variável de grande influência na otimização do processo de obtenção de biodiesel.

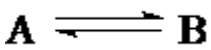
Um exemplo de trabalho inovador, em termos de substituição da fonte de energia empregada para a obtenção de biodiesel é o de Rodrigues *et al*., (2009) que realizou o estudo da reação de transesterificação assistida por ultrassom a 40kHz de freqüência, em condições ambientes de temperatura e pressão, produzindo biodiesel etílico de óleo de soja, obteve um rendimento de 91,8%, com 0,35% de hidróxido de sódio e 30 minutos de reação, na razão molar óleo/etanol de 1:10,2.

Líquidos iônicos têm sido investigados de diversas maneiras para a produção de biodiesel. Como exemplo tem-se o estudo da produção de biodiesel via enzimática usando o líquido iônico 1-n-butil-3-metil imidazólio-bis (trifluoro metil sulfonil) imida por Gamba (2008), a 30°C na presença de água. Uma das desvantagens deste método seria o alto tempo de reação (8h) para atingir cerca de 90% de rendimento e a grande quantidade de solventes usados: relação mol/mol de etanol/água 85:15, apesar de poderem ser reaproveitados no final do processo via destilação, percebe-se que sempre haverá uma perda significativa, agregando prejuízos ao processo. De acordo com Knothe *et al*., (2006) o uso de co-solventes tais como metil terc-butil éter (MTBE) e tetrahidrofurano (THF), também têm se mostrado interessante por aumentar sensivelmente a velocidade do processo, uma vez que geraria um sistema monofásico durante a reação, superando a miscibilidade limitada dos álcoois no óleo vegetal, principalmente em relação ao etanol.

7.2.5 Possíveis Catalisadores para Obtenção do Biodiesel

A palavra catálise deriva da palavra grega *katálusis* que significa dissolução, decomposição, e foi adotada pelo químico sueco Jöns Jacob Berzelius em 1836, quando se referia a certas substâncias cruciais para a ocorrência de algumas reações (RINALDI *et al*., 2007). No entanto, Wilhelm Ostwald foi o primeiro a enfatizar que um catalisador influencia a velocidade de uma reação e que não tem efeito sobre a posição de equilíbrio (MOORE, 1976). Sendo assim, já era sabido que catalisadores que produzissem um composto B a partir de um composto A, também poderia produzir o composto A a partir de B.

Como o catalisador muda a velocidade, mas não o equilíbrio, deve acelerar as reações diretas e inversas na mesma proporção, tal como descreve a equação seguinte:



O tipo de catalisador empregado é um fator determinante na velocidade da reação bem como na taxa de conversão e também pela possível reação entre o catalisador (hidróxido) e ácidos graxos. Há dois tipos de catálise: a homogênea, na qual toda reação ocorre numa só fase, e catálise heterogênea, na qual a reação ocorre em interfaces entre fases. De acordo com Moore, (1976) a dependência da velocidade da reação em função da concentração do catalisador é uma característica da catálise homogênea e pode ser expressa pela lei de velocidade (lei da ação das massas) formulada na década de 1860, por Cato M. Guldberg (1836-1902) e Peter Waage (1833-1900).

Com maior predominância, a catálise básica homogênea é largamente adotada na transesterificação de óleos vegetais, principalmente com bases fortes como hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH), devido aos altos níveis de conversão atingidos nesse processo e aos baixos custos dos catalisadores. Entretanto, sua utilização possui duas importantes limitações: a primeira devido à formação de sabão pela neutralização dos ácidos graxos livres presente no óleo e a segunda no que se refere às limitações das etapas de purificação do biodiesel as quais dificultam a reutilização do catalisador devido ao caráter de dissolução das bases iônicas e consequentemente grande contaminação do biodiesel pelas mesmas, os íons metálicos ficam solubilizados no meio. Quando existe quantidade considerável de água no meio reacional, ocorre formação de ácidos graxos pela hidrólise dos ésteres presentes, que por estarem em meio básico, promovem um processo irreversível, representado pelo mecanismo representado pela figura 06 a seguir:

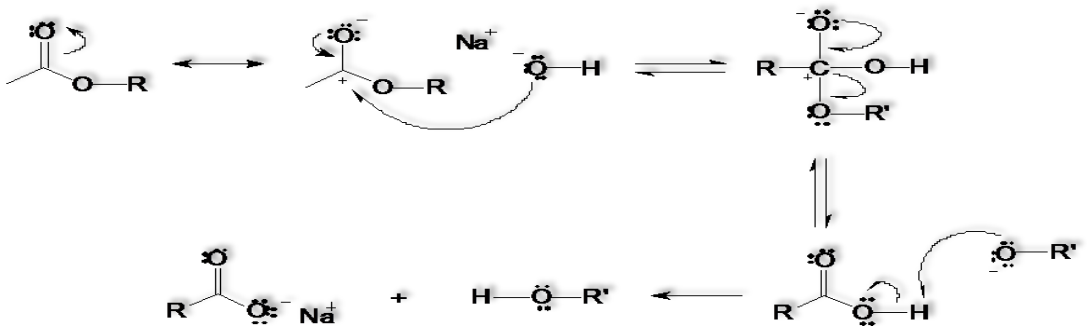


Figura 06: Mecanismo da Reação de Saponificação de Triglicerídeos.
(R = Grupo Alquil).

A figura 07 mostra a formação de ácidos graxos livres, sendo considerada uma reação paralela indesejável pela qual também há formação de sabões.

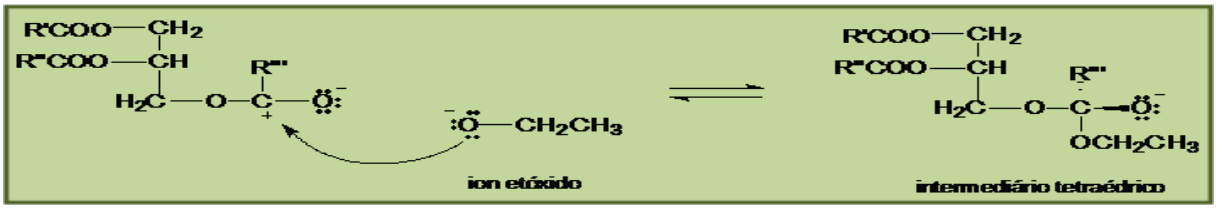
Figura 07: Reação de Neutralização de Ácidos Graxos Livres

Entretanto, como afirma Suarez *et al.*, (2007), os catalisadores básicos tradicionais são largamente utilizados na indústria para obtenção de biodiesel, pois, além de serem menos agressivos aos equipamentos, apresentam atividades até 4.000 vezes superiores às verificadas para os ácidos minerais. Contrário a esta relação de atividade, apontada para triglicerídeos usuais, foi recentemente observado que para transesterificação do óleo de mamona, catalisadores ácidos, como HCl, podem apresentar uma atividade superior à dos básicos, como o hidróxido de sódio. Esta diferença provavelmente se deve ao fato do óleo de mamona possuir em sua composição cerca de 90% de ácido ricinolêico, que possui um grupo hidroxila no C-12 da cadeia. Uma das estratégias conhecidas desde a década de 40 e ainda usada para óleos vegetais que contêm alto teor de ácidos livres é o uso combinado das duas classes de catalisadores tradicionais, fazendo-se, inicialmente, uma esterificação dos ácidos graxos livres presentes através de catálise ácida, seguida da transesterificação dos triglicerídeos em meio alcalino.

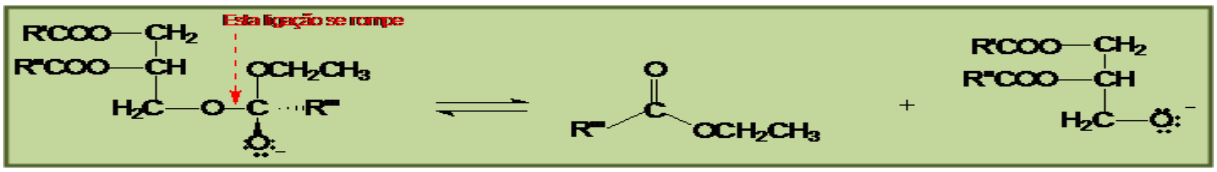
As etapas seguintes representam o mecanismo geral da reação de transesterificação via catálise alcalina proposto por Schurchardt *et al.*, (1998) onde di- e monoacilglicerídeos reagem pelo mesmo mecanismo produzindo uma mistura composta predominantemente de ésteres alquílicos e glicerol.

- Etapa 1. Formação do íon etóxido a partir da reação da base com o álcool:

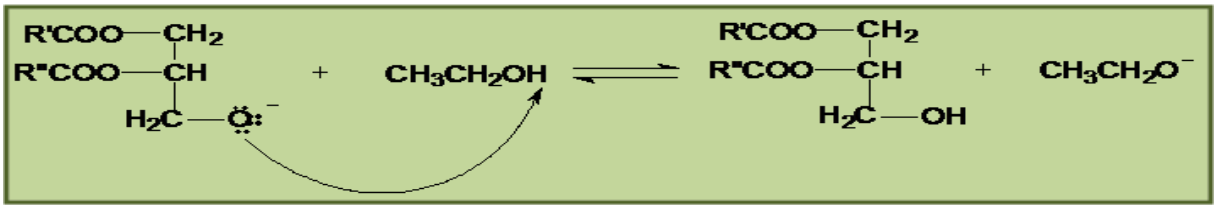
- Etapa 2. Por ser uma base mais forte que o íon hidróxido, o íon etóxido é bastante reativo. Sendo assim, este realiza um ataque nucleofílico ao carbono da carbonila do triglicerídeo (óleo vegetal) formando o intermediário tetraédrico instável:



- Etapa 3. O intermediário tetraédrico sofre um rearranjo para formar a primeira molécula de éster etílico e o ânion correspondente do diglicerídeo:



- Etapa 4. O ânion do diglicerídeo é fortemente básico e por isso retira um próton H^+ do álcool, o qual se encontra em excesso no meio. Dessa forma, ocorre regeneração do catalisador (íon etóxido) que pode então reagir com o segundo carbono carbonílico do diglicerídeo:



Dessa forma, a reação de transesterificação se propaga quebrando cada molécula do triglicerídeo em três moléculas de ésteres alquílicos. Existe uma segunda via de transesterificação na catálise básica proposta por Meher *et al*., (2002), em que a diferença consiste no fato de que o intermediário reage com o álcool regenerando o catalisador e formando um novo composto intermediário tetraédrico. Por fim, na etapa seguinte, o composto intermediário se rearranja para formar uma molécula de diacilglicerol (R"OH) e éster (R'COOR). Sendo assim, este considera que não há formação do ânion diglicerídeo fortemente básico, como é descrito na etapa 4 representada acima.

Para minimizar os problemas associados ao uso de catalisadores homogêneos, consideráveis atenções têm-se dado à utilização de catalisadores heterogêneos tais como zeólitas, óxidos de metais alcalino e alcalino-terrosos, polímeros com catalisadores suportados, dentre outros. Esses catalisadores poderiam minimizar os custos de separação e purificação dos produtos e seriam reutilizados. Também já foram testados complexos organometálicos com alta solubilidade em triglicerídeos, do tipo ácido de Lewis, obtidos com cátions metálicos, como estanho, cádmio, zinco, e chumbo além dos ligantes oxigenados bidentados, como 3-hidroxi-2-metil-4-pironato ($C_6H_5O_3$) e carboxilatos. Na metanólise do óleo de soja verificou-se que a atividade destes catalisadores está associada à sua acidez, sendo o sistema mais ativo o $Sn(C_6H_5O_3)_2$ $(H_2O)_2$, com a vantagem de se obter uma fácil separação do biodiesel e da glicerina no final da reação, uma vez que não há reação de hidrólise e nem formação de emulsões. Até mesmo para sistema com baixa atividade, como o $Cd(acetato)_2$, foi possível otimizar as condições reacionais para se obter conversões mais altas (SUAREZ *et al*., 2007).

Os alcoolatos tem sido uma opção interessante de catalisadores alcalinos para a reação de transesterificação já que são isentos de água. Isso resulta em maiores rendimentos evitando reações indesejadas. Estes alcoolatos são comercializados em meio alcoólico (na presença de metanol ou etanol). Quando se faz reagir um álcool com um metal alcalino como o sódio há a formação dos alcoolatos e gás hidrogênio, de acordo com a equação a seguir:

Também tem sido estudado o uso de enzimas como é o caso de Faccio (2004) onde a conversão mais elevada foi de 98% em 6 horas de reação, usando o sistema óleo de mamona / Lipozyme IM, nas condições de maior temperatura 65°C, concentração de enzima de 20% m/m, razão molar óleo-etanol 1:3. No entanto, o maior inconveniente da via enzimática tem sido o alto tempo de reação.

Segundo Suarez *et al*., (2007) seria interessante o uso de catalisadores heterogêneos já que poderiam minimizar os custos de separação e purificação do álcool, da glicerina e do biodiesel. Contudo, um entrave seria o elevado tempo de reação. Sendo assim, destaca-se o trabalho publicado por Arzamendi *et al*., (2008) o qual testou a atividade catalítica de alguns

compostos de metais alcalinos e alcalino-terrosos na proporção molar óleo/metanol 1:12, usando óleo de girassol, a 323K (50°C) em reator do tipo batelada. Concluiu-se que a baixa solubilidade de alguns catalisadores em meio metanólico tornou o meio heterogêneo, aumentando, com isso, o tempo de reação. Os carbonatos de sódio e potássio, o fosfato de sódio e o óxido de cálcio, forneceram os melhores rendimentos, apesar do elevado tempo de reação. Os catalisadores heterogêneos fornecem facilidade na purificação do biodiesel obtido, o que deve ser considerado. Contudo, sabe-se que a qualidade destes catalisadores está diretamente ligada ao aumento da superfície de contato, sendo que muitas vezes será necessário um tratamento térmico (calcinação em mufla a 773K por 12h) o que elevaria ainda mais os custos. Um resumo dos resultados deste trabalho descreve-se na tabela 04, em que consta o tipo de catalisador empregado, o tempo de reação, a porcentagem de conversão e a influência do aumento da superfície de contato no rendimento dos mesmos. Observam-se pela tabela 04 os baixos rendimentos atingidos por estes catalisadores devido principalmente à baixa solubilidade dos mesmos. Sabe-se ainda que a maior porcentagem de conversão (3,5%) do óxido de magnésio (MgO) esteve relacionada a uma maior superfície de contato obtida (aproximadamente 96 m^2/g).

Tabela 04: Catalisadores de Metais Alcalinos e Alcalino-terrosos usados no Estudo da Reação de Transesterificação.

Catalisador	Tempo de reação (h)	Conversão (%)	Superfície de contato (m^2/g)
$NaHCO_3$	**4**	**1**	**-**
Na_2HPO_4	**4**	**0,2**	**-**
NaH_2PO_4	**4**	**0**	**-**
$KHCO_3$	**4**	**0,7**	**-**
K_2HPO_4	**4**	**0,6**	**-**
CaO*	**24**	**1,5**	**10 ± 0,6**
$CaCO_3$	**24**	**2,5**	**0,6 ± 0,1**
MgO	**24**	**3,5**	**96 ± 4**
MgO*	**24**	**2,5**	**37 ± 1**
$MG(OH)_2.4MgCO_3$	**24**	**2,5**	**20 ± 0,5**

Fonte: ARZAMENDI *et al.*, 2008

De acordo com Dubé et al., (2007) também são descritos na literatura trabalhos envolvendo o uso de catalisadores ácidos, tais como ácido sulfúrico (H_2SO_4). Entretanto faz-se necessário um tempo de 6 horas de reação, temperatura de 65°C e altas concentrações desse catalisador para obtenção de rendimentos pequenos de cerca de 64% em comparação com as bases iônicas tradicionais 96% em média, com um tempo de 60 minutos: hidróxido de potássio (KOH) e/ou hidróxido de sódio (NaOH).

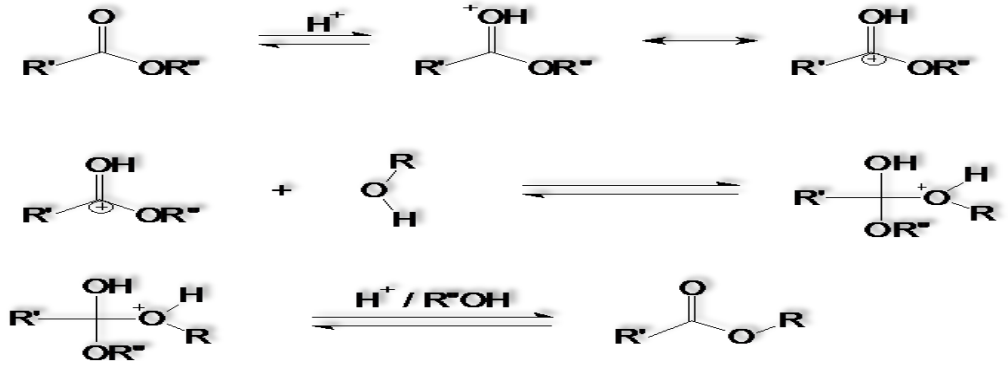


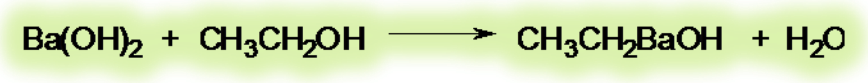
Figura 08: Mecanismo da Reação de Transesterificação Via Catálise

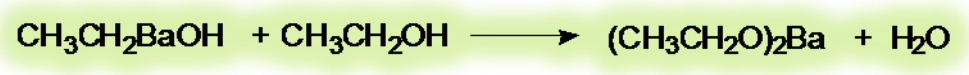
A utilização de ácido sulfônico (-SO_3H) exibiu a vantagem de poder ser funcionalizado em superfícies poliméricas (GUERREIRO *et al.*, 2006). Artigo publicado por Rezende *et al.*, (2005) utilizou resinas sulfônicas em suporte de resina a base de estireno-divinilbenzeno, em comparação com o uso de ácidos sulfônicos em meio homogêneo. Concluiu-se que o rendimento aumenta devido ao aumento na porosidade, formando assim, uma maior superfície de contato entre os reagentes. Apesar da utilização destes catalisadores permitirem a obtenção de elevados rendimentos, as reações são lentas, requerendo, muitas vezes, mais de 3h para se completar (VARGAS, 1996).

Gryglewicz (1999) realizando um estudo comparativo entre óxido de cálcio, metóxido de cálcio e hidróxido de bário obteve metil ésteres de óleo de canola, sendo que o maior rendimento foi obtido usando hidróxido de bário como catalisador. Este resultado mostrou que seu alto rendimento deve estar associado a uma maior solubilidade deste álcali em metanol. Neste estudo também se testou o uso do co-solvente tetrahidrofurano (THF), com o objetivo de avaliar a sua eficiência, apresentando também resultados promissores.

O mecanismo da reação de transesterificação de triglicerídeos usando hidróxido de bário como catalisador ainda não está bem esclarecido, porém, acredita-se que o mesmo perde um grupo OH e se liga ao carbono do álcool liberando uma molécula de água. Na segunda etapa,

outra molécula de álcool é desprotonada e o bário se liga aos dois átomos de oxigênio formando um composto intermediário instável, liberando uma segunda molécula de água, como exemplificam as equações químicas a seguir (GRYGLEWICZ, 1999).





Este intermediário instável formado - $(CH_3CH_2O)_2Ba$ – vai liberar íon alcoóxido, desencadeando as etapas sucessivas da reação de transesterificação segundo o mecanismo de catálise básica. Neste processo existem dois incovenientes: o primeiro é que o bário é altamente tóxico na forma de compostos solúveis, uma vez que permite a absorção pelo trato gastrointestinal, quando ingerido, o que poderia trazer riscos ambientais e o segundo é a baixa solubilidade deste em álcool (GRYGLEWICZ, 1999). Contudo, medidas de segurança mais rigorosas poderiam seguramente amenizar o primeiro incoveniente. Para o segundo incoveniente, as medidas paliativas seriam o emprego de co-solventes eficientes, a ponto de tornar a reação mais efetiva, e assim aumentar os rendimentos.

Um álcool é uma substância cuja composição é carbono, hidrogênio e oxigênio. Apresenta no mínimo um grupo OH ligado a um carbono saturado. Os alcoóis são substâncias muito importantes para a economia mundial. Podem ser obtidos principalmente de duas fontes: por processos bioquímicos, tendo como exemplo a fermentação de fontes amiláceas (batata-doce, mandioca etc) ou ricas em sacarose (cana de açúcar, beterraba, entre outras). Seus usos variam desde combustíveis até matérias primas para os diversos tipos de indústrias: farmacêutica, alimentícia e indústria química em geral, para a fabricação de polímeros e outros materiais. A segunda fonte de obtenção seria por via química, tendo como matéria-prima certas frações do petróleo. Obtido através de bioprocessos, o etanol seria uma boa opção do ponto de vista ambiental, já que, por meio da fotossíntese, permitiria o aproveitamento do gás carbônico produzido pela sua combustão. No Brasil, é o solvente mais comum, obtido da fermentação do caldo da cana-de-açúcar, ao contrário do que ocorre na quase totalidade dos países industrializados, que utilizam etanol puríssimo, obtido por via petroquímica, pela hidratação do etileno. Assim, o produto brasileiro possui uma série de componentes voláteis, subprodutos

da fermentação, que lhe dão sabor e aroma, e é utilizado como bebida, conhecida popularmente como cachaça (MANO *et al.*, 2004).

7.3 PRINCIPAIS ETAPAS PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Após a seleção e limpeza dos grãos ou sementes, os mesmos serão submetidos à extração do óleo. Basicamente existem dois processos utilizados: mecânico e por solventes. Cada processo será aplicado de acordo com as particularidades de forma e tamanho dos grãos, amêndoas ou sementes, sendo escolhido aquele que for mais conveniente. O primeiro normalmente possui menor custo em relação ao segundo. No entanto, o processo de extração mecânica apresenta menor rendimento de óleo. Algumas usinas usam os dois processos conjugados por entenderem ser mais proveitoso. Na figura 09 apresenta-se um exemplo de extrator mecânico simples comercializado pela empresa norte-americana ALVAN BLANCK, com capacidade de produção de 150 quilos de óleo por hora.

Figura 09: Extrator Mecânico de Óleos.
Fonte: ALVAN BLANCK, 2009

A figura 10 apresenta simplificadamente o resumo do processo de produção de biodiesel.

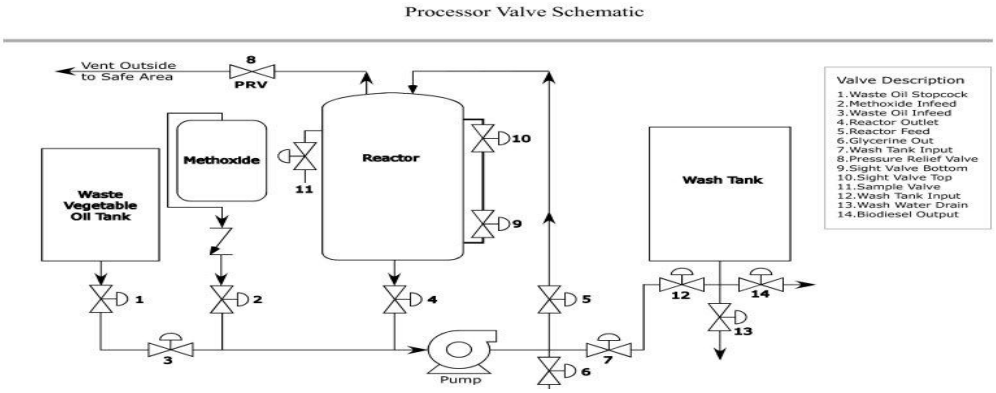


Figura 10: Planta Simplificada para a Produção de Biodiesel.
Fonte: HOME MADE BIODIESEL, 2009

O álcool e a base (hidróxido de sódio ou de potássio) reagem no tanque de metóxido e posteriormente são misturados ao óleo até o reator onde ocorrerá a reação de transesterificação propriamente dita. A glicerina é separada pela válvula 6 e o biodiesel vai para o tanque de lavagem passando pela válvula 7. Os resíduos são separados do biodiesel (glicerina, álcool, metais etc) pela válvula 13 e o biodiesel purificado sai finalmente pela válvula 14.

7.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O futuro da tecnologia de obtenção de biodiesel é incerto. Porém, tendo por base a redução de custos não somente durante o processo, mas considerando toda a cadeia produtiva do biodiesel, podemos discutir a ocorrência de dois cenários prováveis, Estes dois cenários podem ser pensados a partir do tipo de catalisador utilizado, fator que representa maior influência em todas as variáveis do processo de transesterificação.

O primeiro cenário poderia ser resultado dos avanços dos estudos da catálise homogênea. O catalisador homogêneo ideal deveria, além de trazer rendimentos ótimos e tempos de reação míninos, dispensaria processos de purificação podendo ser queimados na câmara de combustão juntamente com o biodiesel sem causar significativas emissões de gases poluentes e sem causar danos ao motor. O segundo cenário seria representado por um catalisador heterogêneo reutilizável capaz de fornecer rendimentos e tempos de reação comparáveis ao do hidróxido de potássio. Este também dispensaria qualquer processo de purificação com a vantagem adicional de ser reutilizado, resultando em biodiesel de alta qualidade. Sendo assim, espera-se que as pesquisas atinjam esse objetivo. Associado a este tipo de P & D, reatores modernos e eficientes deverão ser projetados com o intuito de favorecer bons rendimentos. O formato, o tamanho e a dinâmica destes reatores será melhorada de acordo com o tipo de catalisador utilizado: homogêneo ou heterogêneo. Por exemplo, o uso de reatores de leito fixo seria necessário, caso seja empregada a catálise homogênea numa usina de biodiesel. No entanto, sabe-se que, na prática, reatores do tipo *Batch* (batelada) podem ser adaptados para sistemas de produção contínua, devido em parte à peculiaridade da reação de transesterificação poder ser realizada em duas etapas para assegurar um rendimento reacional próximo a 100%. Este é o caso do reator de fabricação húngara, utilizado pela Biotins Energia Ltda, que vem gerando bons resultados.

Outra questão menos técnica e mais econômica que influência nas tecnologias de obtenção de biodiesel é o tipo de álcool utilizado. Na Europa e principalmente EUA, não se fala em rota etílica, uma vez que seu alto consumo e paralelamente a sua alta produção de petróleo inviabiliza o uso de etanol já que se torna mais caro que o metanol. De forma singular, o Brasil já utiliza a rota etílica em nível comercial, tendo como exemplo a empresa FERTIBOM Indústrias Ltda, em Catanduva, interior de São Paulo, além de outras.

REFERÊNCIAS

ALVAN BLANCK. **Oil extraction Systems.** Disponível em: <http://www.alvanblanch.co.uk/Biodiesel.htm> Acesso em: Maio de 2010. (2009)

ARAÚJO, F. D. A.; MOURA, C. V. R.; CHAVES, M. H. **Caracterização do Óleo e Biodiesel de Pinhão-Manso (*Jatropha Curcas* L.).** II Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel. Artigos técnicos e científicos. 2007.

ARZAMENDI, G.; ARGUIÑARENA, E.; CAMPO, I.; ZABALA, S.; GANDÍA, L. M. **Alkaline and alkaline-earth metals compounds as catalysts for the methanolysis of sunflower oil.** Catalysis Today, Pamplona 133-135, 305-313 jan. 2008.

BELLAVER, C.; ZANOTTO, D. L. **Parâmetros de qualidade em gorduras e subprodutos protéicos de origem animal**. Palestra apresentada na Conferência APINCO, Santos, SP, 2004. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/ sgc/sgc_arquivos/palestras_k9r8d4m.pdf> Acesso em: 26 de Maio de 2010.

BIODIESELBR. Comparação com outros óleos. REVISTA biodieselbr ano 2 nº 09 fev/mar 2009. p. 44. Disponível em: <www.biodieselbr.com.br> Acesso em: Setembro de 2009.

BRANDÃO, K. S. R.; SILVA, F.; LOUZEIRO, H. C.; SOUZA, A. G.; CONCEIÇÃO, M. M.; MOURA, K. R. M. **Otimização do Processo de Produção de Biodiesel Metílico e Etílico de Babaçu**. I Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel. Artigos técnico-científicos. 2006.

DORADO, M. P. *et al*., **Optimization of Alkali-Catalyzed Transesterification of Brassica Carinata Oil for Biodiesel Production**, Energy & Fuels, 18, 77-83, 2004.

FACCIO; Carina. **Estudo da Produção de Ésteres Etílicos a Partir da Alcoólise de Óleos Vegetais.** Tese de mestrado. URI Campus Erechim - RS. Mestrado em Engenharia de Alimentos. 99 p. 2004.

FREEDMAN, B., PRYDE, E. H., MOUNTS, T. L., **Variables affecting the yields of fatty esters from transesterification vegetable oils,** Journal of American Oil Chemist Society, v. 61, n.10, p. 1638-1643, 1984.

GAMBA, Muriell. **Produção de Biodiesel através da Catálise Enzimática em Líquido Iônico.** Dissertação de mestrado. UFRGS. Mestrado em Química. 128 p. 2008.

GRYGLEWICZ, S. **Rapeseed Oil Methyl Esters Preparation using Heterogeneous Catalysts.** Bioresource Technology. v. 70. p. 249. 1999.

GUERREIRO, L.; CASTANHEIRO, J. E.; FONSECA, I. M.; MARTIN-ARANDA, R. M.; RAMOS, A. M.; VITAL, J. **Transesterification of soybean oil over sulfonic acid functionalised polymeric membranes.** Catalysis Today, Évora - Portugal, n. 118, 166-171, 2006.

HOME MADE BIODIESEL. **Equipment to production biodiesel.** Disponível em: <http://www.home-made-biodiesel.com/biodiesel-washtank.html> Acesso em: Maio de 2010.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V., KRHAL, J.; RAMOS, L. P. **Manual de Biodiesel.** 1°. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 340 p.

KUCEK, K. T. **Otimização da Transesterificação Etílica do Óleo de Soja em Meio Alcalino.** Dissertação de Mestrado. UFPR. Mestrado em Química: área de Química Orgânica. 107 p. 2004.

KUMAR, A.; SHARMA S. **An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas L.*): A review.** Industrial Crops and Products. Nova Delhi, India. v. 28, 1-10. jan. 2008.

MAKKAR, H. P. S.; BECKER, K.; SPORER, F.; WINK, M. **Studies on Nutritive Potential and Toxic Constituents of Different Provenancesof *Jatropha curcas*.** Journal Agric. Food Chem., Heidelberg - Germany, v. 45, 3152-3157, (1997).

MANO, E. B.; DIAS, M. L.; OLIVEIRA, C. M. F. **Química Experimental de Polímeros.** 1 ed São Paulo Edgard Blucher, 2004.

MEHER, L. C.; SAGAR, D. V., NAIK, S. N., **Technical aspects os biodiesel production by transesterification: a review**, Renewable & Sustainable Energy Reviews, v. 10, p. 248-268, 2006.

MERTINS, O; SEBBEN, M.; SCHNEIDER, P. H; POHLMANN, A. R; SILVEIRA N. P. **Caracterização da pureza de fosfatidilcolina da soja através de RMN de ^{1}H e de ^{31}P.** Química Nova, Porto Alegre-RS, v. 31, n. 7, 1856-1859, set. 2008.

MOORE; J. WALTER. **Físico-química**. 4. ed. americana. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1976. 423 p.

MORETTO, E; FETT, R. **Tecnologia de Óleos e Gorduras Vegetais na Indústria de Alimentos.** 1. ed. São Paulo: Livraria varela, 1998. 149 p.

MOURA, K. R. M.; SILVA, F. C.; BRANDÃO, K. S. R.; SOUZA, A. G.; CONCEIÇÃO, M. M. **Estabilidade Térmica de Sebo Bovino e do Biodiesel Metílico e Caracterização Físico-química.** I Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel. Artigos técnico-científicos, 2006.

PENHA, M. C. S.; SILVA, M. D. P. *et al.,* **Caracterização Físico Química da Semente e Óleo de Pinhão Manso (*Jatropha curcas*) Cultivado no Maranhão.** II Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel. Artigos técnicos e científicos. 2007.

RAO, K. S; CHAKRABARTI, P. P; PRASAD, R. B. N.; RAO, B. V. S. K. **Phospholipid Composition of Jatropha curcas Seed Lipids. Journal American Oil Chemical Society.** n. 86. p. 197- 200. dez. 2008.

RAMOS, L. P.; KUCEK, K. T.; DOMINGOS, A. K.; WILHELM, H. M., Biodiesel: Um projeto de sustentabilidade econômica e sócio-ambiental para o Brasil. Revista Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento, edição nº 31, p. 28-37, 2003.

RINALDI, Roberto *et al.*, **Síntese de Biodiesel**: **uma Proposta Contextualizada de Experimento para Laboratório de Química Geral**. Química Nova. 2007, v.30, n.5, p. 1374-1380. 2007.

RODRIGUES, S.; MAZZONE, L. C. A.; SANTOS, F. F. P.; CRUZ M. G. A.; FERNANDES, F. A. N. **Optmization of the production of ethyl esters by ultrasound assisted reaction of soybean oil and ethanol.** Brazilian Journal of Chemical Engineering, Fortaleza, CE. v. 26, n. 2, 366-366, 2009.

SANCHEZ, E. M. S. **Obtenção de Novos Catalisadores para a Transesterificação de leos Vegetais.** Tese de mestrado. Unicamp. Mestrado em Química. 84 p. 1990.

SCHUCHARDT, U.; SERCHELI, R.; VARGAS R. M. **Transesterification of vegetable oils: a review.** Journal Brazilian Chemical Society, São Paulo v. 9, n.1 199 - 210, 1998.

SHARMA, Y.C, SINGH, B., UPADHYAY, S. N., **Advancements in development and charactherization of biodiesel: A review**, Fuel, v. 87, p. 2355-2373, 2008.

SILVA, C. L. M. **Obtenção de Ésteres Etílicos a Partir da Transesterificação do Óleo de Andiroba com Etanol.** Dissertação de Mestrado. Unicamp. Mestrado em Química: área de Química Inorgânica. 78 p. 2005.

SILVA, N. L. **Otimização das Variáveis de Processo da Transesterificação (etanólise) do Óleo de Mamona: Produção de Biodiesel**. Dissertação de mestrado. Unicamp. Mestrado em Engenharia Química. 115 p. 2006.

SUAREZ, P. A. Z. *et al.*, **Transformação de Triglicerídeos em Combustíveis, Materiais Poliméricos e Insumos Químicos: Algumas Aplicações da Catálise na Oleoquímica.** Química Nova, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 667-676. mai/jun. 2007.

TEIXEIRA, J. P. F. **Teor e Composição do Óleo de Sementes de *Jatropha spp***. Bragantia Campinas n. 46, vol. 1, p. 151-157. 1987.

VARGAS; R. M. **Transesterificação de Óleos Vegetais, Catalisada por Bases não Iônicas, em Fases Homogênea e Heterogênea.** Tese de doutorado. IQ Unicamp. Doutorado em Ciências: Química Orgânica. 152 p. 1996.

VISÃO BIOQUÍMICA. Biomoléculas. Universidade de Brasília. UnB. Disponível em: <http://www.bioq.unb.br/htm/biomoleculas/geral/fosfatidilinositol.htm> Acesso em: Junho de 2009.

ZAGONEL, G. F. **Obtenção e Caracterização de Biocombustíveis a partir da Transesterificação Etílica em Meio Alcalino.** Dissertação (Mestrado em Química Orgânica), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.

CAPITULO VIII

SOBRE O CONSUMO DE LENHA DOMICILIAR RURAL NAS REGIÕES BRASILEIRAS

SOBRE O CONSUMO DE LENHA DOMICILIAR RURAL NAS REGIÕES BRASILEIRAS

Arlindo Kamimura[25]
Geraldo F. Burani[26]

RESUMO

A lenha é ainda uma importante fonte de energia na geração direta de calor. Sua importância no Brasil é percebida na indústria, comércio/serviços e nos domicílios rurais. Enquanto que nos dois primeiros segmentos sua comercialização se dá de forma regular, no sentido contábil e fiscal, no setor residencial sua oferta é geralmente realizada num circuito irregular e informal, dificultando sua contabilização em balanços energéticos. O objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta metodológica para avaliação do consumo da lenha nos domicílios rurais baseada no consumo de seu concorrente direto, o GLP - gás liquefeito de petróleo.

Palavras chave: balanço energético; consumo de lenha; setor residencial

8.1. INTRODUÇÃO

A utilização da lenha pela humanidade como fonte de energia remonta à época da descoberta do fogo. Sua relevância como fonte energética permanece e deverá continuar por muito tempo ainda, tanto nos países em desenvolvimento, como nos países desenvolvidos, principalmente nas áreas fora dos centros urbanos. Assim, sua importância como fonte de calor para cocção, aquecimento de água e ambiental torna sua presença obrigatória em qualquer estatística ou balanço de energia. Entretanto, sua contabilização representa sempre um problema metodológico, basicamente por dois motivos. Em primeiro lugar, dada sua grande diversidade e não homogeneidade estrutural – forma, densidade, teor de umidade e, portanto, seu poder calorífico torna-se difícil a tarefa de contabilização, mensuração e padronização de suas propriedades físico-químicas. Em segundo, dada a não uniformidade dos meios de extração, manejo, disponibilização e comercialização acontecerem, na maioria das regiões rurais brasileiras, em bases tradicionalmente informais no setor residencial, as estatísticas oficiais de sua oferta e consumo deixam muito a desejar, no que concerne à confiabilidade e precisão. A unidade de medida usualmente adotada para a lenha é o metro cúbico *stere* (m^3st), que tem

[25] Professor do PPGE/IEE/USP - autor para correspondência kamimura@iee.usp.br
[26] Professor do PPGE/IEE/USP

tanta precisão métrica como a utilização do termo "feixe de lenha". Assim, um feixe de lenha no Rio Grande do Sul pode não ter as mesmas propriedades e características de um feixe de lenha no Rio Grande do Norte, por razões óbvias. Entretanto, neste trabalho, em benefício da coerência, considerar-se-á o "feixe de lenha" ou, no caso, o metro cúbico *stere* (m^3st) como uma unidade de medida homogênea e de métrica consistente para todo o Brasil, com as propriedades físicas e químicas estabelecidas e definidas no BEN - Balanço Energético Nacional.

O consumo de lenha nas residências rurais para cocção e aquecimento apresenta uma grande discrepância de valores entre as várias regiões do Brasil. Uma mostra do espectro de variância dos resultados obtidos nas diversas estimativas existentes na literatura é apresentada na tabela 1 e exemplifica a citada incerteza deste dado nos domicílios brasileiros.

Tabela 1: Algumas estimativas do consumo mensal de lenha nos domicílios rurais

1.) Balanço Energético Nacional (Brasil 2006)	268,56 kg / domicílio
2.) A. T. do Vale ET alii, (Goiás 2003)	316,20 kg / domicílio
3.) Mata, H. T. et al (Minas Gerais 2000)	765,9 kg / domicílio
4.) CEMIG, Minas Gerais 1985, em 2.)	360 a 543 kg / domicílio
5.) Oliveira (semi árido Paraíba 1992), em 2.)	282 a 288 kg / domicílio
6.) Uhlig A. (Brasil 2008)	135 kg / domicílio

A realização de uma série de Balanços Energéticos Estaduais pelos pesquisadores do IEE/USP – Instituto de.Eletrotécnica e Energia financiada pela Diretoria de Gás e Energia da Petrobrás [Burani et alii, (2005), (2006), (2008), (2009a), (2009b), (2009c), (2009d), (2009e); Kamimura e Almança, (2007)] permitiu a constatação, *in loco*, do enorme grau de incerteza associado ao problema proposto, principalmente em relação à apresentação física, extração, comercialização e formas de utilização. Por outro lado esses trabalhos propiciaram um razoável conhecimento qualitativo e quantitativo, tanto do *cross section* quanto da dinâmica relacionados à questão do energético chamado lenha, fundamental para as estimativas efetuadas nos vários estados brasileiros. Um fato relevante constatado nestes estudos foram as diversas formas de utilização da lenha nos equipamentos residenciais rurais, isto é, foi observado uma nítida competição entre o fogão à lenha e o fogão à GLP, ambos presentes na maioria das residências. A utilização de uma forma ou de outra depende essencialmente da disponibilidade de oferta e do preço da lenha, fonte de energia preferencial na maioria dos domicílios rurais. Um modelo teórico não linear de substituição entre formas de energia

desenvolvido pelos pesquisadores do IEE/USP [Kamimura et alii (2006); Kamimura et al (2008)] foi utilizado como balizador dos resultados deste trabalho.
O objetivo deste trabalho é, portanto, relatar a metodologia adotada pelos pesquisadores do IEE/USP, na estimativa do consumo residencial rural da lenha nos diversos Balanços Energéticos realizados em diversos estados brasileiros.

8.2. MATERIAIS E MÉTODO

Ao contrário da lenha dita comercial, ou seja, aquela que transita legalmente no circuito fiscal, largamente utilizada na indústria e setor comércio/serviços, a lenha consumida nos domicílios, principalmente rural, carece totalmente de uma contabilidade confiável. Assim sendo, sua estimativa deve ser realizada de forma indireta, a partir de informações relacionadas com o objeto do trabalho, levantadas de preferência por algum órgão ou instituição que divulgue dados estatísticos confiáveis. Neste caso, os dados são da POF/IBGE – Pesquisa de Orçamento Familiar do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, usualmente utilizados para a composição oficial dos índices econômicos e sociais. Essa pesquisa realizada por amostragem, aproximadamente a cada seis anos, faz um levantamento nacional minucioso das despesas mensais médias das famílias urbanas e rurais. Infelizmente, a lenha não é um item levantado nessa pesquisa. Entretanto, o gás doméstico comparece como um item dessas despesas e através do seu preço regional é possível transformá-lo em unidade física e, portanto, passível de uso na estimativa da energia necessária para cocção nos domicílios.

8.2.1. Hipóteses adotadas

A hipótese básica adotada nos cálculos é a de que o consumo de lenha residencial se dá apenas para cocção e apenas nos domicílios rurais e sua utilização se dá em concorrência direta com o gás doméstico, no caso o GLP – Gás Liquefeito de Petróleo, distribuído em botijões de 13 kg. O consumo de lenha para aquecimento (ambiental e água) é estimado a partir dessa lenha para cocção e será explanado adiante. As informações sobre o consumo de gás doméstico (GLP) são obtidas da POF 2002 e POF 2008. As demais hipóteses assumidas são as seguintes:

- A necessidade de energia útil, aquela efetivamente utilizada, independentemente da fonte energética, para cocção por domicílio é igual, tanto para residências urbanas, quanto para as rurais, na respectiva região brasileira, em 2002.

- O cálculo dessa energia útil por domicílio é obtido a partir do consumo de GLP em residências urbanas, em fogões com a eficiência de 30% e a fonte de informação é a POF 2002. O motivo da não utilização da POF 2008 para o cálculo da energia útil urbana é devido ao fato de uma grande mudança de hábitos urbanos referentes à alimentação observada no período 2002/2008, mudança essa não observada no meio rural.

- A necessidade de energia útil para cocção, por domicílio rural, no caso igual à urbana, é suprida pelo GLP e pela lenha. A eficiência do fogão à GLP, igual à urbana, é de 30% e a do fogão à lenha é assumida com sendo de 8%.

- A necessidade mensal da lenha para cocção (em kg/domicílio) como fonte de energia é, portanto, obtida como uma necessidade complementar ao gás doméstico nas residências rurais. Entretanto, um fato foi amplamente observado nas pesquisas do IEE/USP (*op. cit.*): a utilização dessa lenha é realizada de forma extremamente perdulária, isto é, o fogão a lenha praticamente fica em *stand by* durante o dia todo e intensificado seu uso no horário das refeições. Além disso, sua utilização é também para aquecimento de água para banho e em alguns lugares para aquecimento ambiental. Por estes motivos, o consumo médio mensal total da lenha nos domicílios rurais foi estimado como sendo de três vezes o valor obtido para a cocção.

8.2.2. Resultados a partir da POF 2002 e POF 2008

Os cálculos foram realizados tanto a nível nacional, quanto por regiões brasileiras apresentados a seguir:

a) Energia útil mensal das residências urbanas para cocção = (despesa urbana com GLP/preço do botijão) x peso do botijão x poder calorífico inferior do GLP x eficiência do fogão a gás.

b) Parcela da energia útil mensal das residências rurais para cocção atendidas pelo gás = (despesa rural com GLP/preço do botijão) x peso do botijão x poder calorífico inferior do GLP x eficiência do fogão a gás.

c) Energia útil mensal atendida pela lenha rural = (a – b).

d) Energia final mensal atendida pela lenha = (a –b) / eficiência do fogão à lenha.

A tabela 2 e a tabela 3 resumem os resultados para o Brasil e regiões, para o ano de 2002 e 2008.

Tabela 2: Consumo de lenha mensal (kg/domicílio) nas residências rurais – Brasil e regiões - 2002:

2002	CO	NE	N	SE	S	BR
PR.BOTJ. (R$)	30,89	29,28	31,03	28,28	29,84	29,2
DESP.RUR. (R$)	21,79	12,02	14,63	14,64	15,66	14,78
DESP.URB.(R$)	23,42	21,69	22,44	20,03	21,17	20,97
E.UT.RUR.(kg glp)	9,170	5,337	6,129	6,730	6,822	6,580
E.UT.URB. (kg glp)	9,856	9,630	9,401	9,208	9,223	9,336
E.UT.RUR.(kcal)	31087,3	18091,6	20778,1	22814,2	23127,9	22306,7
E.UT.URB. (kcal)	33412,7	32646,1	31870,2	31213,7	31265,5	31648,9
E.UT.LNH.RUR.(kcal)	2325,5	14554,5	11092,1	8399,5	8137,6	9342,2
E.FIN.LNH.RUR. (kcal)	29068,5	181931,7	138650,8	104993,5	101719,9	116778,0
lenha(kg/domic.mes)	**28,14**	**176,12**	**134,22**	**101,64**	**98,47**	**113,05**

Fonte: Elaboração a partir da POF 2002

Tabela 3: Consumo de lenha mensal (kg/domicílio) nas residências rurais – Brasil e regiões - 2008:

2008	CO	NE	N	SE	S	BR
PR.BOTJ. (R$)	33,94	33,16	33,79	32,32	34	33,11
DESP.RUR. (R$)	19,03	14,49	17,86	20,46	15,15	16,55
DESP.URB.(R$)						
E.UT.RUR.(kg glp)	7,289	5,681	6,871	8,230	5,793	6,498
E.UT.URB. (kg glp)	9,856	9,630	9,401	9,208	9,223	9,336
E.UT.RUR.(kcal)	24709,8	19257,4	23293,6	27898,3	19637,1	22028,3
E.UT.URB. (kcal)	33412,7	32646,1	31870,2	31213,7	31265,5	31648,9
E.UT.LNH.RUR.(kcal)	8702,9	13388,7	8576,6	3315,4	11628,4	9620,6
E.FIN.LNH.RUR. (kcal)	108786,1	167359,4	107207,1	41442,2	145355,1	120256,9
lenha(kg/domic.mes)	**105,31**	**162,01**	**103,78**	**40,12**	**140,71**	**116,42**

Fonte: Elaboração a partir da POF 2002, POF 2008 e PNAD 2006

Como podem ser observados, os resultados obtidos para o consumo mensal de lenha estão sensivelmente abaixo das estimativas da tabela 1. Observa-se uma redução do consumo de lenha em 2008, nas regiões Nordeste, Norte e Sudeste, mesmo com o aumento do preço do GLP, devida, provavelmente, à redução da oferta de lenha em função do aumento da procura por carvão vegetal na siderurgia e mesmo como lenha na indústria. Em contrapartida, nas regiões em que a oferta de lenha aumentou ou não foi tão pressionado por outras formas de uso, o consumo de lenha domiciliar aumentou caso das regiões Centro-Oeste e Sul. No Brasil, na média, observa-se um discreto aumento no consumo. As figuras 1 e 2 mostram a evolução

do consumo mensal de lenha nos domicílios rurais no Brasil e regiões. Os valores intermediários entre 2002 e 2008 foram obtidos por interpolação geométrica.

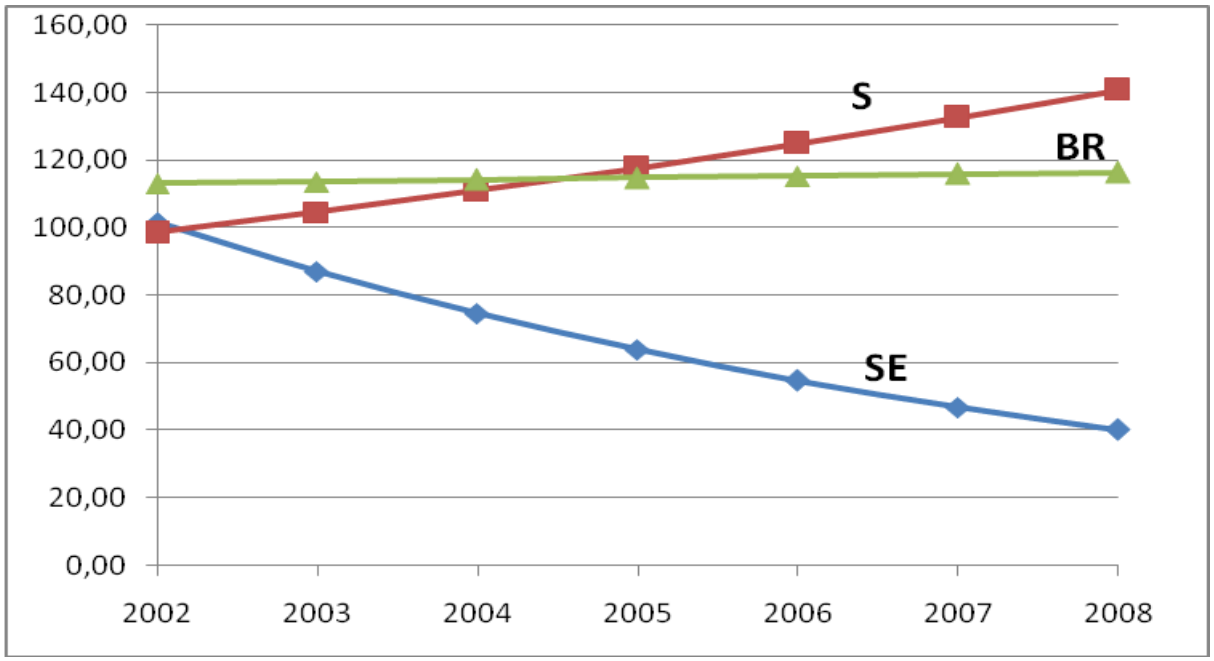


Figura 1: EVOLUÇÃO DO CONSUMO MENSAL DE LENHA POR DOMICILIO RURAL (kg/res.mes) NAS REGIÕES SUL, SUDESTE e BRASIL.
Fonte: Elaboração a partir da tabela 1 e tabela 2.

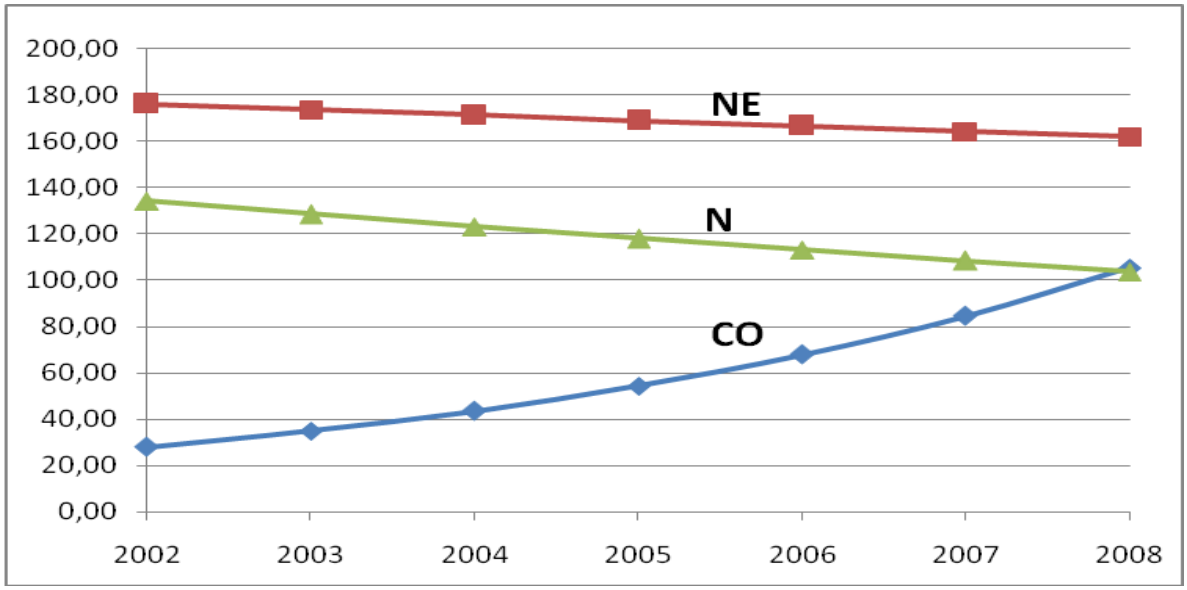


Figura 2: EVOLUÇÃO DO CONSUMO MENSAL DE LENHA POR DOMICILIO RURAL
(kg/res.mes) NAS REGIÕES NORDESTE, NORTE E CENTRO-OESTE:
Fonte: Elaboração a partir da tabela 1 e tabela 2.

8.3. CONCLUSÃO

Não se solidificou, até o momento, um procedimento metodológico aceito de forma consensual, para a estimativa do consumo de lenha residencial, nas regiões rurais brasileiras, em virtude das características, diversidade e especifidade desta fonte de energia. Sua importância é indiscutível na matriz brasileira e portanto, presença obrigatória no planejamento energético nacional e regional. A presente proposta metodológica de cálculo pretende ser uma contribuição para se atingir uma modesta forma de *síntese*, certamente não no sentido da dialética *hegeliana*, uma vez que, tanto a *tese* quanto a *antítese* não foram ainda estabelecidadas na discussão deste processo.

REFERÊNCIAS

A. T. do Vale et alii, "*Estimativa do consumo residencial de lenha em uma pequena comunidade rural do município de São João d`Aliança, Goiás*", Ciência Florestal, Santa Maria, v.13, nº 2, pp. 159-165, (2003).

BEN 2006, "*Balanço Energético Nacional 2006*", MME – Ministério de Minas e Energia, (2006). Disponível em www.mme.gov.br.

Burani G. F. et alii, *"Balanço Energético do Mato Grosso do Sul, 2005, ano base 2004"*, IEE/USP – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, SP, (2005).

_____, *"Balanço Energético do Rio Grande do Norte, 2006, ano base 2005"*, IEE/USP – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, SP, (2006).

_____, *"Balanço Energético do Tocantins, 2007, ano base 2006"*, IEE/USP – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, SP, ISBN 978-85-86923-14-2, (2008).

_____, *"Balanço Energético do Maranhão, 2008, ano base 2007"*, IEE/USP – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, SP, ISBN 978-85-86933-16-6, (2009 a).

_____(2009 b), *"Estudo de Cenários Energéticos para o Estado do Ceará"*, IEE/USP – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, SP, ISBN 978-85-86923-22-7.

_____(2009 c), *"Estudo da Projeção da Matriz Energética do Maranhão 2030"*, IEE/USP – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, SP, ISBN 978-85-86923-18-0.

_____(2009 d), *"Estudo da Projeção da Matriz Energética do Ceará 2030"*, IEE/USP – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, SP, ISBN 978-85-86923-20-3.

_____(2009 e), *"Estudo de Cenários Energéticos para o Estado do Maranhão"*, IEE/USP – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, SP, ISBN 978-85-86923-17-3.

Kamimura, A., Guerra, S. M. e Sauer, I., L., "*On the substitution of energy sources: prospective of the natural gas market share in the Brazilian urban transportation and dwelling sectors*", Energy Policy, 34, (2006), 3583 – 3590.

Kamimura, A. e Almança, R., (2007), "*Balanço Energético do Estado de São Paulo 2007, ano base 2006*", Secretaria de Saneamento e Energia, Série Informações energéticas, 002, SP, 216 p.

Kamimura, A., e Sauer, I. L., *"The effect of flex fuel vehicles in the Brazilian light road transportation"*, Energy Policy 36, pp.1574-1576, (2008).

Mata, H. T. C. e Souza, A. L., "*Estimativa do consumo residencial de lenha num distrito do Estado de Minas Gerais, Brasil*", revista Arvore, Viçosa, MG, v. 24, nº 1, pp.63-71, (2000).

PNAD (2006), Pesquisa Nacional por Amostragem de domicílios - IBGE. Disponível em: www.ibge.gov.br.

POF (2002), Pesquisa de Orçamento Familiar – IBGE. Disponível em: www.ibge.gov.br.

POF (2008), Pesquisa de Orçamento Familiar – IBGE. Disponível em: www.ibge.gov.br.

Uhlig, Alexandre. **Lenha e carvão vegetal no Brasil***: balanço oferta-demanda e métodos para a estimação do consumo*. 124p. Tese (Doutorado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, (2008).

CAPITULO IX

ESTUDO SOBRE AS VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA GASOLINA, ETANOL E A MISTURA DOS DOIS COMBUSTÍVEIS EM MOTORES FLEX FUEL

ESTUDO SOBRE AS VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA GASOLINA, ETANOL E A MISTURA DOS DOIS COMBUSTÍVEIS EM MOTORES FLEX FUEL

Thiago Magalhães de Lázari[27]
Yolanda Vieira de Abreu[28]

"A idade da pedra não acabou porque acabaram as pedras; não é necessário que o petróleo acabe para entrarmos em uma nova era de energia"
SHELL

RESUMO

No Brasil, os automóveis podem funcionar a gás natural veicular (GNV), gasolina, etanol e mistura de etanol e gasolina. A prática de se misturar etanol à gasolina é comum desde a década de 1930 e, atualmente, a gasolina contém 25% de etanol. No Brasil, o desenvolvimento de um motor capaz de rodar com etanol, gasolina ou ambos misturados em quaisquer proporções começou nos anos 1990. O primeiro automóvel dotado da tecnologia flex fuel (etanol, gasolina ou mistura entre os dois combustíveis) foi lançado no Brasil em março de 2003 pela Volkswagen, utilizando um sistema desenvolvido pela Bosch. O motor bicombustível oferece ampla liberdade de escolha para os usuários, podendo optar pelo combustível de acordo com seu preço, disponibilidade no mercado e desempenho do veículo, considerando as diferenças no rendimento do motor com uso da gasolina ou etanol. Países como EUA, Canadá, Reino Unido, Alemanha e outros possuem veículos com tecnologia flex. Entretanto, somente no Brasil esses veículos possuem a opção de operar com 100% de etanol. Este artigo tem como objetivo analisar os veículos flex fuel e as relações entre o consumo do etanol comparado com a gasolina, considerando fatores como rendimento, preço e sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Veículos; Motores; Combustíveis; Rendimento.

9.1 INTRODUÇÃO

Desde o início do século XX, o setor automotivo tem se destacado no mercado. O automóvel tornou um símbolo de poder econômico e de *status* social. A quantidade de carros em circulação aumentou de tal forma que transformou cidades, abriram-se estradas e incentivou-se maior prospecção de petróleo. Este por sua vez, por ser o principal combustível utilizado para abastecimento e manutenção dos veículos, forçou a necessidade da construção de plataformas para sua produção, refinarias, gasodutos e redes de distribuição de seus derivados

[27] Mestrando em Agroenergia (UFT). E-mail: thiagolazari@uft.edu.br
[28] Professora do Mestrado em Agroenergia – UFT. E-mail: yolanda@uft.edu.br

[1]. O mundo moderno foi construído utilizando diferentes tipos de combustíveis fósseis principalmente o petróleo e seus derivados. O petróleo se destaca pela possibilidade de diversificação do seu uso, por ser de fácil transporte e ainda por estar disponível em quantidades possíveis de mantê-lo no mercado por longos anos.

Todo o sistema de produção de energia no século XX foi dominado pela utilização indiscriminada de combustíveis fósseis, que representavam ainda no início do século 80% de toda a energia produzida no mundo [2]. No setor de transporte, a gasolina se destaca como o principal combustível, sendo largamente demandada por onde a indústria automobilística se implantava.

Atualmente, a frota mundial de veículos corresponde a mais de 1 bilhão de unidades, distribuídos entre automóveis, furgões, caminhonetas, peruas, caminhões e ônibus, circulando constantemente por todos os países do planeta [1], sendo dotados de motores de combustão interna consumindo em sua grande maioria derivados de petróleo para seu funcionamento. Diariamente, mais de 165 mil veículos são produzidos e acrescentados a essa frota, o que significa mais dois veículos por segundo [1].

Estudos e pesquisas têm sido desenvolvidos de forma intensiva no Brasil e no mundo, em busca de combustíveis alternativos que sejam renováveis e sustentáveis e que possam substituir o petróleo no abastecimento destes veículos. Esses novos combustíveis devem ser de fontes de energia renováveis e menos prejudiciais ao meio ambiente quando comparadas ao petróleo, e devem possuir as seguintes características: tecnologia disponível no mercado, viabilidade econômica, segurança de fornecimento, fácil acesso, manuseio e transporte.

Neste contexto pode-se destacar os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento que vêm sendo aplicados em realidade prática através do uso de biocombustíveis, tendo como seu representante principal o etanol. Tais investimentos em pesquisa e desenvolvimento ocorreram nas mesmas proporções em que se tornaram freqüentes as preocupações quanto à poluição ambiental causada pelo uso excessivo de hidrocarbonetos fósseis, os reflexos econômicos devido ao aumento dos preços internacionais do petróleo e pelos constantes conflitos ocorridos entre países possuidores das maiores reservas mundiais desta fonte de energia. A fusão destes fatores resultou numa intensa corrida para o desenvolvimento, produção e usos dos biocombustíveis a níveis mundiais.

O impacto ambiental decorrente do uso de combustíveis fósseis levou os governos de diversos países, assim como aconteceu no Brasil, a iniciar programas de investimento em pesquisa, desenvolvimento e transferência de tecnologias para a substituição destes combustíveis. Alguns países testaram o carro elétrico, o solar, a hidrogênio, a biocombustível dentre outros. Algumas destas experiências se transformaram em realidades, e atualmente é possível observar que cada país vem realizando testes buscando a maneira mais viável para substituição do uso dos combustíveis fósseis em suas frotas de veículos, levando em consideração a fonte de energia, tecnologia e os recursos naturais disponíveis em sua região com potencial para sua aplicação.

Os biocombustíveis têm substancial aceitação no mercado brasileiro e também a nível mundial. A principal justificativa para isso é o fato de serem combustíveis menos poluentes quando comparados aos de origem fóssil e ainda renováveis. Tanto o etanol quanto o biodiesel já vem sendo utilizados nos veículos em praticamente todo o mundo [3]. A produção de biocombustíveis no Brasil, Estados Unidos, China e União Européia podem ser observadas na Tabela 01.

Tabela 01: Produção de Biocombustíveis por País,

PAÍS	**ETANOL**		**BIODIESEL**		**TOTAL**	
	Milhões/litros	Toe	Milhões/litros	Toe	Milhões/litros	Toe
Brasil	19.000	10.44	227	0.17	19.227	10.60
USA	26.500	14.55	1.688	1.25	28.188	15.80
China	1.840	1.01	114	0.08	1.954	1.09
União Européia	2.253	1.24	6.109	4.52	8.361	5.76

Fonte: [4]

A tabela 01 destaca a posição dos Estados Unidos frente a outros países na produção de biocombustíveis principalmente o etanol, sendo que este país utiliza o milho como principal matéria prima para sua produção. Já a União Européia se destaca pela elevada produção de biodiesel, entretanto ainda é incipiente na produção de etanol carburante. No Brasil a agroindústria sucroalcooleira se destaca na produção de etanol, embora ainda esteja em busca da consolidação do mercado de uso e produção do biodiesel.

A elaboração de medidas obrigatórias e voluntárias adotadas por vários países e a efetividade dos programas Norte Americanos para produção e consumo de etanol, colaboram para que os biocombustíveis, principalmente o etanol, consigam se consolidar como uma tecnologia eficiente para substituir em partes os hidrocarbonetos fósseis derivados de petróleo, principalmente a gasolina. Os resultados obtidos através da utilização deste biocombustível nas frotas de veículos de vários países são satisfatórios e fazem com que as tendências de consumo aumentem geometricamente em todo o mundo (Gráf. 01).

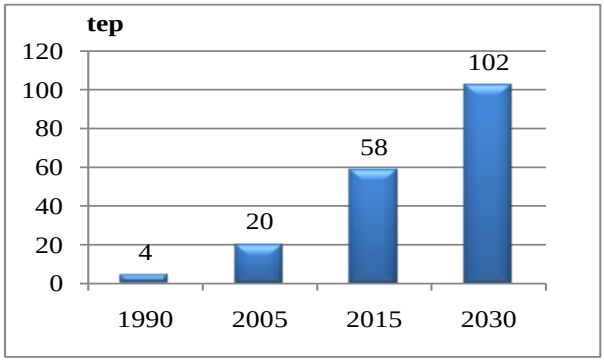


Gráfico 1: Tendência do consumo de biocombustíveis (tep)
Fonte: [5].

No Brasil, através de programas de incentivo do governo federal, a indústria automobilística desenvolveu motores automotivos com tecnologia Flex que podem ser acionados com diferentes combustíveis no mesmo automóvel. A indústria também disponibiliza ao consumidor automóvel movido exclusivamente a etanol ou gasolina.

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo sistemático sobre os automóveis dotados da tecnologia flex fuel, bem como dos combustíveis utilizados em seus motores: etanol, gasolina e a mistura dos dois ao mesmo tempo. A meta deste artigo é comparar as vantagens e desvantagens do uso destes combustíveis considerando suas características técnicas. Esse tema se justifica pelo fato das constantes dúvidas técnicas entre os possíveis compradores, que gostariam de adquirir um automóvel com essa tecnologia. As dúvidas são referentes à eficiência proporcionada pela nova tecnologia e principalmente pelos rendimentos característicos dos combustíveis utilizados. Porém, é pertinente demonstrar que mesmo existindo dúvidas sobre a tecnologia e os combustíveis, esses tipos de automóveis são os mais vendidos no Brasil e tende a ser cada vez mais aceito pelo mercado automobilístico brasileiro.

9.2 BIOCOMBUSTÍVEIS E A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA BRASILEIRA

Os primeiros passos rumo ao etanol de cana-de-açúcar foram dados ainda nos anos 1920, quando se deu início à produção de álcool carburante [6]. Seu uso como combustível só aconteceu de forma efetiva em 1931, quando a adição de 5% (v/v) de álcool etílico anidro combustível (AEAC) à gasolina tornou-se obrigatória. A partir de 1966, essa quantidade aumentou para 10%. Posteriormente, como resposta à crise mundial do petróleo, foi proposto o uso direto de álcool etílico hidratado combustível (AEHC) em veículos automotivos leves.

Em 1975 foi criado, o Programa Nacional do Álcool – PROÁLCOOL, que teve como objetivo garantir o suprimento de combustível para o país, buscando substituir a gasolina por um combustível renovável e encorajar o desenvolvimento tecnológico da indústria da cana-de-açúcar e do álcool [7]. Em meados da década de 80, como a produção de álcool combustível excedia o consumo, foi proposta a adição de 22% de AEAC à gasolina. Esse percentual diminuiu para 13% no início da década de 90, quando ocorreu uma redução na produção de álcool. A situação quanto ao percentual de AEAC adicionado à gasolina se mostrou oscilante até 1994, quando, então, se oficializou a adição de 22%. Este percentual foi posteriormente aumentado para 24% em 1997, e para 25% no ano de 2003 [8]. Desde 1º de fevereiro de 2010 o percentual de mistura de AEAC à gasolina foi reduzido para 20% e permanecerá assim durante 90 dias retornando ao percentual de 25%. O objetivo é aumentar a quantidade do combustível renovável no mercado e com isso conter a alta de preço nos postos.

Os primeiros estudos em busca de automóveis eficientes que poderiam utilizar combustíveis renováveis foram realizados nos Estados Unidos ainda na década de 80 [1], resultando nos primeiros veículos dotados da tecnologia denominada flex fuel, popularmente conhecido como bicombustível e que podem ser abastecidos com combustíveis diferentes. A tecnologia utilizada pelos Norte Americanos foi rapidamente difundida para o Brasil [1], porém com técnicas de produção diferenciadas. A tecnologia utilizada pelos EUA é baseada no uso de sensor de identificação que analisa qual combustível está sendo utilizado e informa ao motor que ajusta o sistema de injeção e ignição para melhorar a condição da queima. No Brasil a tecnologia baseia-se nas diferenças existentes em duas das características físico-químicas do etanol e da gasolina (octanagem e relação estequiométrica) e usam os mesmos diversos

sensores funcionais que todos os veículos modernos já têm (sensores de pressão e temperatura do ar, de vazão do combustível, de carga, rotação e de detonação do motor e de oxigênio do gás de escapamento). Esta técnica torna o processo eficaz, pois o combustível é queimado primeiro na câmara de combustão sendo possível identificá-lo e realizar os ajustes sem a utilização do sensor de identificação. Desta forma, a indústria brasileira disponibiliza um veículo flex fuel pelo mesmo preço de um veículo que pode utilizar somente o etanol como combustível [1].

Através da facilidade de acessibilidade a estes veículos, o Brasil já ultrapassou o quantitativo de 7 milhões de automóveis flex fuel [9], e pelo fluxo contínuo de produção e venda, a tendência é que este número aumente exponencialmente (Gráf. 02).

O mais recente relatório elaborado pela ANFAVEA demonstra que em 2009 as vendas de veículos no Brasil atingiram a marca de 2.874.077, sendo que deste montante, 2.500.000 foram automóveis dotados da tecnologia flex fuel (Gráf. 03), ou seja, aproximadamente 87% dos veículos comercializados em 2009 [10].

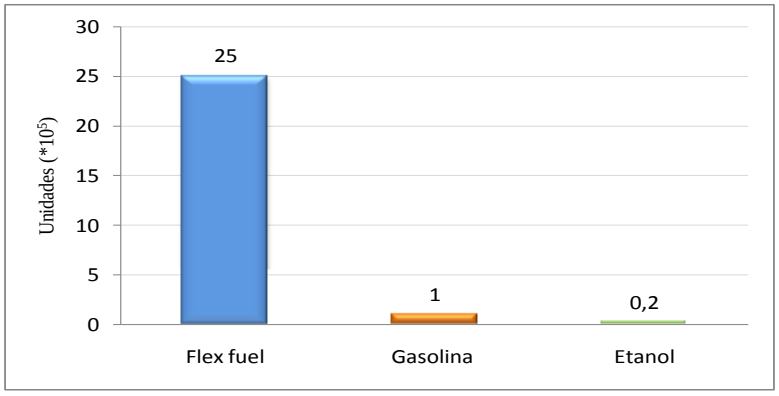


Gráfico 02: Vendas de Veículo no Brasil - 2009
Fonte: [10]

Devido a uma cadeia energética de biocombustíveis bem estruturada, o Brasil oferta o etanol no mercado interno com preços constantemente vantajosos em relação à gasolina. Assim, a cada dia cresce o número de brasileiros que tem que lidar diariamente com a dúvida: etanol ou gasolina?

Anualmente, a indústria automobilística brasileira produz para o mercado interno cerca de 1,5 milhão de veículos leves com motores de combustão interna, assim como ocorre em outros países, porém estão adaptados para queimar etanol puro ou com gasolina misturada com 20 a 25% de etanol [1]. Nove fabricantes estão oferecendo mais de 60 modelos de veículos *flex* no mercado brasileiro, com preço equivalente aos dos veículos similares convencionais [1].

A tabela 02 apresenta um comparativo da produção brasileira de automóveis entre os anos 2008, 2009 e 2010[29].

Tabela 02: Produção de Automóveis por Combustível em Unidades entre os anos 2008 – 2010.

AUTOMÓVEIS	2008	%	2009	%	2010	%
Gasolina	534.949	21,01	322.868	12,52	126.665	19,36
Etanol	*	*	*	*	*	*
Flex fuel	1.984.941	77,97	2.244.166	87,05	524.478	80,16
Diesel	25.839	1,01	10.705	0,42	3.159	0,42

Fonte: [10]
Obs.: * Não houve Produção.

Entre os anos 2008 e 2009 o percentual da produção de automóveis flex fuel saltou de 77,97% para 87,05%. Levantamentos realizados pela ANFAVEA no início de 2010 estimam que a produção de automóveis flex fuel se manterá acima dos 80% do mercado, demonstrando a aceitação desta tecnologia pelos consumidores brasileiros.

Segundo a ASSOVEPAR a frota brasileira de veículos em 2009 chegou a quase 28 milhões, sendo que 6.720.000 possuem motor flex fuel (24%), 2.800.000 movida exclusivamente a etanol (10%), 2.240.000 a diesel (8%) e a maioria 16.240.000 possuem motor exclusivo à gasolina (58%) [11].

É importante considerar que o mercado brasileiro de etanol combustível é composto pelas vendas de álcool anidro e álcool hidratado. O álcool anidro está relacionado ao consumo da gasolina, uma vez que a gasolina brasileira possui em 25% de sua composição o álcool anidro. O álcool hidratado, por sua vez, é consumido pelos carros movidos puramente a álcool, ou pelos carros flex fuel que rodam com álcool e/ou gasolina (com a mistura de 25% de etanol)

[29] Levantamento realizado até 20 de Abril de 2010.

em qualquer proporção [12]. O aumento da oferta de etanol no Brasil é um dos resultados deste processo de expansão da frota de carros bicombustíveis ou flex fuel e este último da maior conscientização ecológica por parte dos consumidores [13].

9.3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada foi do tipo exploratório, descritivo e bibliográfico, com procedimentos de coleta de dados primários e secundários relacionada ao uso etanol, gasolina e a mistura entre os dois combustíveis em automóveis com motores de combustão interna dotados da tecnologia flex fuel. Posteriormente, os dados obtidos foram analisados e sistematizados de forma a fundamentar conceitos, objetivando compartilhar informações com aplicabilidade no processo de incentivo de produção e uso da tecnologia flex fuel na frota de automóveis brasileira.

9.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

9.4.1 Motor de Combustão Interna

Motores de combustão interna são máquinas térmicas alternativas, destinadas ao suprimento de energia mecânica ou força motriz de acionamento, podendo ser classificados como de ignição por centelha e ignição por compressão [14]. Podem ser operados com diferentes combustíveis, incluindo materiais líquidos, gasosos e mesmo sólidos [15].

O primeiro motor de combustão interna foi inventado e construído por Jean Joseph Étiènne Lenoir, engenheiro belga, nascido em 1822, em Luxemburgo [1]. Mais tarde, Nikolaus August Otto, nascido em 1832, na Alemanha, estudando os trabalhos de Jean, acabou descobrindo o valor da compressão da mistura de combustível e ar, antes de queimar na câmara de combustão, o que aumentava significativamente a força gerada pelo motor. A partir daí, surge à idéia do ciclo de quatro tempos de movimento do êmbolo (ou pistão), e nasce o Motor Ciclo Otto movido à gasolina [1].

Em 1883 Gottlieb Daimler e Wilhelm Maybach construíram um carburador e o associaram a um sistema de ignição também desenvolvido por eles. O resultado desta evolução tecnológica foi um grande salto na evolução dos motores de combustão interna. O primeiro motor de

quatro tempos a queimar gasolina e realmente utilizável foi concebido e projetado em 1885 por Gottlieb Daimler, sócio de Otto e Langen. No mesmo ano, Karl Benz, alemão, também desenvolveu um bem- sucedido à explosão. Os atuais motores conservam-se basicamente semelhantes a esses [16]. O primeiro veículo motorizado a ser produzido com propósito comercial foi um carro com apenas três rodas. Este foi produzido, em 1885, pelo alemão Karl Benz e possuía um motor a gasolina. Depois foram surgindo outros modelos, vários deles com motores de dois tempos, inventado, no ano de 1884, por Gottlieb Daimbler. Em 1892, Henry Ford produziu seu primeiro Ford na América do Norte [17].

Na mesma época, em 23 de Fevereiro de 1897, Rudolf Diesel registrou a patente de seu motor-reator, desenvolvido para trabalhar com óleo de origem vegetal. Tais motores a injeção, desde que regulassem a pressão no sistema de injeção, poderiam funcionar com qualquer tipo de óleo, tanto derivados de petróleo como o Diesel, quanto de origem vegetal (como óleo de amendoim) ou animal (como é o caso da gordura de porco) [18]. Através dos trabalhos de Rudolf Diesel, buscando desenvolver um motor de combustão interna que tivesse o maior rendimento possível, nasce o motor de ciclo diesel utilizando o óleo diesel para seu funcionamento [1]. Assim, a partir de 1900, os derivados de petróleo como a gasolina e o Diesel, se tornam oficialmente os combustíveis dos automóveis, uma vez que estava disponível no mercado em grandes quantidades, era mais fácil de serem transportados e tinham preços mais acessíveis que os seus concorrentes.

Como os veículos eram movidos exclusivamente a produtos derivados de petróleo, logo começaram a surgir descobertas de vários problemas ocasionados pelo uso intensivo destes combustíveis. Os problemas de corrosão provocados pelo uso dos derivados de petróleo foi um dos fatores determinantes para a busca de combustíveis alternativos [8]. Outro motivo decisivo foi o aumento do preço do barril do petróleo na década de 1970, as constantes guerras nas principais regiões produtoras e consequentemente os problemas na comercialização deste combustível.

O uso de hidrocarbonetos fósseis em máquinas e equipamentos implica no seu contato com os diversos materiais metálicos constituintes dos sistemas veiculares, de transporte e armazenamento etc. Essa interação pode ocasionar a corrosão metálica [8]. A utilização de combustíveis com alto conteúdo de enxofre pode causar a corrosão do bronze utilizado em bombas de combustíveis, assim acontecia com os aditivos da gasolina [19].

Recentemente, estudos desenvolvidos com etanol carburante demonstraram que sua qualidade é um aspecto de suma importância no seu efeito corrosivo, já que ele puro não ocasiona corrosão [8]. Em geral, a corrosão ocasionada pelo etanol combustível está associada a algumas impurezas presentes e ao uso de determinados aditivos [8].

Nos últimos anos de evolução do motor de combustão interna, um dos fatores que mais têm preocupado pesquisadores, fabricantes e governos é a emissão de poluentes para a atmosfera. A queima incompleta de combustível efetuada nos motores de veículos tem sido um dos maiores responsáveis por diversos problemas ambientais e de saúde da população global [20]. Este problema originou um novo tipo de indústria [1], que considera, dentre outros a redução do perfil energético. Esta redução leva em consideração a produção de equipamentos mais eficientes [21], como é o caso do motor flex fuel, que passou por anos de estudo e pesquisa em busca de uma tecnologia realmente eficaz, constituindo um passo à frente compatível com a busca de modelos de carros menores, eficientes e mais baratos.

9.4.2 Rendimento Etanol *versus* Gasolina

O que promove a variação de rendimento nos motores de combustão interna em automóveis flex fuel, quanto ao consumo, autonomia, desempenho, economia dentre outros, não é especificadamente o motor e sim sua interação com as peculiaridades dos próprios combustíveis. Tanto o etanol, quanto a gasolina possuem características específicas em suas composições que devem ser previamente consideradas, pois se relacionam diretamente e conjuntamente nos processos de combustão. Neste tópico foi tratado sobre algumas características específicas de cada combustível e como elas interferem no trabalho e rendimento do motor.

A gasolina, como combustível derivado do petróleo, não é uma substância pura. É constituída por uma mistura complexa de hidrocarbonetos (C5-C12) parafinemos, olefínicos, naftênicos e aromáticos, cuja faixa de destilação varia entre 30-220ºC. Possui também compostos de enxofre, oxigênio, nitrogênio e metais em pequenas concentrações. Suas propriedades são influenciadas pelos processos de refinamento e pela natureza do petróleo que a originou. À gasolina podem ser adicionado ainda tolueno, xilenos, álcoois anidros e aditivos com

finalidades específicas (antioxidantes, antidetonantes, anticongelantes, detergentes etc.) [8], objetivando melhorar o processo de combustão e o rendimento do produto.

O etanol, ao contrário da gasolina, é uma substância pura, embora seja encontrada nos postos como sendo uma mistura de 95% de etanol e 5% de água, em volume. É representado por uma molécula cuja fórmula é C_2H_5OH [16]. Por ter oxigênio na composição, a molécula ganha uma polaridade que faz com que o etanol seja líquido à temperatura ambiente pela maior coesão entre as moléculas. É um combustível que não deixa borras, sendo bem mais "limpo" que a gasolina [22].

Para que um combustível seja considerado viável comercialmente é preciso que ele tenha capacidade de evaporar com facilidade, tenha potencial para liberar grande quantidade de energia, esteja disponível no mercado em quantidade que atenda a sua demanda, sua tecnologia esteja dominada e que apresente preços acessíveis aos consumidores. Quanto ao desempenho e rendimento nos motores de combustão interna, algumas características devem ser consideradas: Poder calorífico, Octanagem, Calor de vaporização, Proporção estequiométrica e Ponto de fulgor. Na tabela 03, são demonstradas algumas características específicas da gasolina e do álcool hidratado.

Tabela 03: Especificidades da Gasolina e do Álcool Hidratado

GASOLINA	ÁLCOOL HIDRATADO
Estequiometria: 13,8:1	**Estequiometria: 8,9:1**
Octano: ± 81 (MON)	**Octano: ± 90 (MON)**
Pressão de vapor[2]: ± 38 kPa	**Pressão de vapor[2]: ± 9 kPa**
Poder calorífico: 9.600 kcal/kg	**Poder calorífico: 6.100 kcal/kg**
Densidade (20°): 756 kg/m^3	**Densidade (20°): 810 kg/m^3**

Fonte: [23]

Das seis propriedades destacadas, a gasolina e o álcool anidro se divergem quanto a valores em todas elas. Todas estas características atuam de forma conjunta no processo de funcionamento de um motor. A diante, cada característica será discriminada isoladamente objetivando direcionar o entendimento sobre as interferências provocadas no motor.

9.4.3 Poder Calorífico

Poder calorífico pode ser definido como a quantidade de calor emitido pela combustão completa de um combustível, e é importante para a determinação do rendimento final de um determinado combustível [24]. O etanol tem um calor de vaporização de 0,744 MJ/l, enquanto a gasolina tem 0,325MJ/l [20]. Isto quer dizer que o etanol necessita de mais do que o dobro de energia para se vaporizar [22]. A energia demandada para que um combustível possa se vaporizar, sendo esta adquirida por meio do calor produzido pelo motor que também aquecer o coletor, é maior em um motor a etanol [25]. O baixo poder calorífico é uma das desvantagens do etanol em relação à gasolina, pois provoca o aumento do consumo. Entretanto, devido à sua octanagem mais alta permite sua utilização em motores com taxa de compressão elevada, o que se traduz em aumento de potência [15]. Embora com poder calorífico inferior a gasolina e o etanol tem características que permitem excelente desempenho aos motores, entre as quais citam-se a larga faixa de inflamabilidade; maior poder antidetonante; um elevado calor latente de vaporização; densidade superior a da gasolina e baixo ponto de fulgor, assim como a gasolina [23].

9.4.4 Octanagem

Octanagem é o índice de resistência à detonação de combustíveis usados em motores no ciclo de Otto. O etanol tem maior poder antidetonante do que a gasolina. Enquanto a gasolina comum tem em média 85 octanas, o etanol tem mais de 90. Significa que ele consegue suportar maior compressão sem explodir espontaneamente, fazendo com que um motor a etanol possa ter uma taxa de compressão maior do que um motor a gasolina. Enquanto as taxas para gasolina variam entre 9 e 10,5:1, para o etanol ficam entre 12 e 13,5:1 [25]. Como o rendimento térmico de um motor (percentual da energia do combustível que é transformada em movimento pelo motor) aumenta conforme aumenta sua taxa de compressão, os motores a etanol tendem a ter um rendimento térmico maior que um motor a gasolina, compensando parte do menor poder calorífico [22]. A adição de etanol à gasolina aumenta sua octanagem e diminui as emissões de CO_2, CO, SO_2 e hidrocarbonetos [8].

9.4.5 Calor de Vaporização

Também conhecido como entalpia de vaporização, é a quantidade de energia necessária para que um mol de um elemento ou de uma substância que se encontra em equilíbrio com o seu

próprio vapor, a pressão de uma atmosfera, passe completamente para o estado gasoso. O etanol possui mais que o dobro do calor de vaporização da gasolina, isto é, necessita mais do que o dobro da energia para se vaporizar [22]. A energia para vaporizar é conseguida através do calor do motor, que também aquece o coletor. Porém, ao se vaporizar, o combustível diminui a temperatura do coletor, pois está "roubando" energia [25]. Portanto, pode se concluir que o etanol "rouba" mais que o dobro de energia, diminuindo muito mais a temperatura do coletor. Se a temperatura cair muito, o combustível não se vaporiza mais e caminha em estado líquido pelo coletor, causando uma súbita falta de combustível na mistura, fazendo o motor falhar. Para evitar isto, faz-se passar água do radiador pelo coletor de admissão, para aquecê-lo. Este aquecimento é muito mais necessário em um motor a etanol, pela sua maior demanda de energia para vaporizar-se [22].

9.4.6 Proporção Estequiométrica

O etanol tem proporção estequiométrica de 8,4:1 (8,4 partes de ar para cada parte de etanol) em massa, enquanto a gasolina tem 13,5:1. Para a mesma massa de ar é utilizado 60% a mais de massa de etanol. Em volume, é necessário mais 43% de etanol do que de gasolina [22]. Por isto, bicos para etanol têm que ter uma vazão em torno de 50% maior do que bicos para gasolina [15]. Apesar de a gasolina fornecer mais 37,5% de energia, o fato de ser necessário 43% a mais de etanol para a mistura faz com que um motor ganhe em torno de 5% de torque e potência só de passar a queimar etanol [22].

9.4.7 Ponto de Fulgor

Uma explosão é uma reação em cadeia. Quando uma molécula de combustível reage com o oxigênio presente no ar, ela gera energia, que faz com que a molécula vizinha também reaja [22]. O ponto de fulgor é a temperatura a partir da qual pode haver uma quantidade suficiente de combustível vaporizado a ponto de gerar uma reação em cadeia. O ponto de fulgor do etanol é 13ºC. Isto significa que não é possível haver combustão do etanol abaixo desta temperatura. Isto explica por que é necessário usar gasolina para a partida a frio em motores a etanol em temperaturas baixas. O ponto de fulgor da gasolina pura é de aproximadamente -40ºC [15]. Estas 2 propriedades acima decorrem do oxigênio presente na molécula do etanol, que a polariza. Isto faz com que a força de coesão entre as moléculas seja maior do que as da gasolina, que se mantém líquida pelo maior peso de suas moléculas, apolares em sua grande

maioria. A menor atração molecular da gasolina é que faz com que esta tenha menor calor de vaporização e ponto de fulgor [22].

9.5 CÁLCULO DE RENDIMENTO ETANOL *VERSUS* GASOLINA

Todas as características supracitadas interferem no rendimento dos combustíveis utilizados. Muitas são as dúvidas dos condutores de automóveis na hora de abastecer com etanol ou gasolina, principalmente quanto ao rendimento (km/l) e autonomia que cada combustível permite que o motor desempenhe. Algumas observações se fazem necessárias para entender a autonomia do automóvel quando é utilizado etanol e/ou gasolina. Em média, a autonomia do veículo movido a etanol é 30% inferior que outro movido a gasolina, o que significa que é preciso mais do biocombustível para cumprir o mesmo percurso que um automóvel movido a gasolina. Assim, para que seja vantajosa sua utilização, torna-se necessário que o preço do litro também seja 30% menor. O cálculo para verificar a viabilidade em abastecer o automóvel com etanol ou gasolina é simples: Pode-se multiplicar o valor da gasolina por 0,7. Se o resultado for um valor superior ao preço do litro de etanol vale à pena abastecer com o biocombustível, caso o valor obtido seja inferior, vale a pena abastecer com gasolina. Exemplo hipotético para base de cálculo: (a) Litro de etanol custando R$ 1,10 e o litro da gasolina custando R$ 2,50; (b) Litro de etanol custando R$ 1,55 e o litro da gasolina custando R$ 2,15, teremos:

Cálculo (a): 2,50 x 0,7 = 1,75

Cálculo (b): 2,15 x 0,7 = 1,50

Observa-se no cálculo (a) que o valor obtido através da equação é superior ao preço do etanol, portanto, nesta condição é recomendado abastecer utilizando etanol. Já no cálculo (2), o preço obtido foi inferior ao preço do litro do etanol, para este caso é recomendado à utilização da gasolina.

9.5.1 Vantagens e Desvantagens da Utilização de cada Combustível

A partir das informações abordadas ao longo do artigo, podemos definir vantagens e desvantagens da utilização da gasolina de forma isolada, do etanol de forma isolada e da mistura entre os dois combustíveis.

A gasolina, quando usada isoladamente na combustão do motor, torna o arranque e o desenvolvimento do automóvel mais eficiente, além de limpar e manter limpo os sistemas de injeção. Gasolina com maior octanagem, queima de forma mais eficiente, resultando em alguns cavalos a mais de potência em alguns veículos. Entretanto, este combustível possui uma série de desvantagens no Brasil como:

1) preço elevado, sendo preferível abastecer com etanol na maioria das vezes;

2) por ser um hidrocarboneto fóssil emite grande quantidade de CO_2 poluindo a atmosfera e ainda, é derivada do petróleo sendo uma fonte de energia finita.

A gasolina incorporada com o etanol tem como principal vantagem a substituição de aditivos com metais pesados (como o chumbo e o manganês) e MTBE, além de reduzir a emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos. Como desvantagem existe a redução da potência e torque do motor, redução do poder calorífico do combustível e aumento da corrosão [22].

Já a utilização isolada do etanol tem sua principal vantagem no rendimento do motor devido a sua maior octanagem em relação à gasolina, permitindo elevação na taxa de compressão e aumentando o rendimento total. Para uma mesma taxa de compressão, a potência aumenta 2% porque 5% da água de composição do etanol evaporam-se dentro do cilindro, aumentando a pressão dentro dele [15]. Um motor utilizando somente etanol terá 24% de potência a mais que o motor a gasolina. Num motor a gasolina, 27% da energia fornecida é aproveitada, enquanto que no motor a etanol atinge 34% e o torque, relacionado diretamente com a potência, será correspondentemente 24% superior [15]. Outra vantagem da utilização isolada do etanol é que a matéria prima utilizada para sua produção é renovável, portanto virtualmente inesgotável, além de reduzir em 66% [15] a emissão de CO_2 quando comparado a gasolina.

9.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os veículos flex fuel têm dominado o mercado brasileiro automobilístico por duas razões principais:

1) as tecnologias aplicadas pela indústria automobilística permitem que o preço de mercado deste veículo se equipare aos automóveis convencionais;

2) biocombustível etanol carburante vêm mantendo seu preço competitivo com o da gasolina.

O rendimento satisfatório do etanol no automóvel flex fuel se dá principalmente pela sua elevada octanagem que promove o aumento na potência do motor e o torna eficiente. Entretanto, é necessário considerar que no conjunto dos fatores o etanol possui rendimento final aproximadamente 30% inferior ao da gasolina, ou seja, se com 1 litro de gasolina um automóvel percorre 10 km, com 1 litro de etanol o mesmo automóvel só percorreria 7 km. Desta forma, o que influencia a escolha entre os combustíveis é o preço de mercado de cada um, sendo que para o abastecimento utilizando etanol só será economicamente viável se o preço do biocombustível for, no mínimo, 30% inferior ao da gasolina. Considerando a diferença de rendimento entre os dois combustíveis, em viagens longas abastecer o veículo utilizando gasolina proporcionaria ao motorista a possibilidade de fazer menos paradas para reabastecimento.

Algumas pessoas optam por abastecer utilizando os dois combustíveis concomitantemente, entretanto esta mistura não provoca diferenças no rendimento do automóvel, podendo o cliente, mediante a observação dos preços de cada combustível e considerando a diferença no rendimento dos mesmos, optar por abastecer somente com o mais viável economicamente.

No Brasil, duas vantagens relacionadas ao etanol o destaca como combustível mais viável: A primeira é que na maioria dos estados brasileiros o preço do etanol é inferior ao da gasolina em mais de 30%, o que viabiliza a utilização isolada deste combustível. A outra vantagem é que por ser produzido através da cana-de-açúcar como matéria prima renovável, o etanol contribui para a redução na emissão de gases de efeito estufa, desempenhando um importante papel na sustentabilidade ambiental brasileira. De forma associada, todos estes fatores contribuem para o sucesso do automóvel flex fuel. Esta tecnologia, de alguma forma, protege o consumidor dos aumentos de preços súbitos do petróleo no mercado e ainda o possibilita fazer escolhas, o que agrada aos usuários de automóveis flex fuel.

REFERÊNCIAS

[1] Junior, H. **Tecnologia de Motores Flexíveis.** Disponível em: <http://www.mre.gov.br/dc/temas/Biocombustiveis_06-tecnologiademotores.pdf Acesso em 02/04/2010> Acesso em: 05 de Abril de 2010.

[2] Goldemberg, J. (2009). **Biomassa e energia**. *Quím. Nova* [online]. 2009, vol.32, n.3, pp. 582-587. ISSN 0100-4042.

[3] Branco, L. (2009). Biocombustíveis Brasileiros e o Mercado Internacional: Desafios E Oportunidades. Revista CEJ, Ano XIII, n. 46, p. 39-48. Brasília – 2009. Disponível em <http://www2.cjf.jus.br/ojs2/index.php/cej/article/viewArticle/1106> Acesso em: 03 de Abril de 2010.

[4] _____. Communication Division. **The state of food and agriculture**. Rome, 2008. 138 p. ISSN 0081-4539. Disponível em: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0100e/i0100e.pdf> Acesso em: 02 de Abril de 2010.

[5] IEA. (2007). **World Energy Outlook.** Paris. Disponível em <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0100e/i0100e.pdf> Acesso em: 09 de Maio de 2010.

[6] Fônseca, M., Paixão, M. (2009) Aspectos Econômicos da Produção Brasileira de Etanol e Sustentabilidade. Revista de Economia Mackenzie. Volume 7. Nº. 2. p. 31-49.

[7] Lima, P. (2004). O Biodiesel e a Inclusão Social. 33 p. Câmara dos Deputados. Consultoria Legislativa. Brasília – DF, 2004. Disponível em <http://apache.camara.gov.br/portal/arquivos/Camara/internet/publicacoes/estnottec/pdf/2004_676_Estudo.pdf> Acesso em: 03 de Abril de 2010.

[8] Ambrozim, A., Kuri, A. (2009). **Corrosão metálica associada ao uso de combustíveis minerais e biocombustíveis.** 7 p. *Quim. Nova*, Vol. XY, No. 00, 1-7. São Paulo, 2009.

[9] FETEC Bancários. (2008). **Com o tempo o mundo vai "se curvar" aos biocombustíveis, afirma Lula.** Disponível em: <http://www.fetecsp.org.br/index.php?option=com_content&task=view&id=40669&Itemid=181.> Acesso em: 05 de Abril de 2010.

[10] ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (2009). **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira.** Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/anuario2009/indice.pdf> Acesso em: 03 de Março de 2010.

[11] ASSOVEPAR – Associação de Revendedores de Veículos Automotores no Estado do Paraná (2009). **Frota Brasileira têm 27,8 milhões de veículos**. Disponível em: <http://www.assovepar.com.br/noticia.php?id=166> Acesso em: 03 de Abril de 2010.

[12] Zanão, A. (2009). **Caracterização da infra-estrutura de armazenagem de álcool no Brasil e análise da sua concentração na região Centro-Sul.** 73 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

[13] Filho, J. (2009). **A estrutura socioeconômica da produção de etanol no Brasil: o uso de fatores primários de produção e as suas relações intersetoriais.** 167 p. Tese **(**Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

[14] PUC – RIO. (2008). Motores de Combustão Interna. Disponível em: <http://146.164.33.61/termo/Motores/curso%2008/0412756_07_cap_04(2).pdf> Acesso em: 05 de Abril de 2010.

[15] Rahde, S. **Motores de combustão interna.** Departamento de Engenharia Mecânica – PUC. Disponível em: <http://www.reocities.com/hiostar/Material/Motores03.pdf> Acesso em: 02 de Abril de 2010.

[16] TUDO SOBRE. **Motor à explosão**. Disponível em <http://www.adorofisica.com.br/trabalhos/fis/equipes/maquinasavapor/motorexplosao.htm> Acesso em: 08 de Maio de 2010.

[17] SEBRAE – Serviço de apoio às Micro e Pequenas Empresas de Santa Catarina. Perguntas Frequentes. Disponível em: <http://www.sebrae-sc.com.br/faq/default.asp?vcdtexto=4611&%5E%5E> Acesso em: 08 de Maio de 2010.

[18] CULTURA BRASIL. Sobre Rudolf Diesel - o verdadeiro criador do motor que não usava derivado de petróleo. Disponível em <http://www.culturabrasil.com.br/programas/radarcultura/limbo/sobre-rudolf-diesel-o-verdadeiro-criador-do-motor-que-nao-usava-derivado-de-petroleo> Acesso em: 08 de Maio de 2010.

[19] Brummett, C., Kanezaki, N., Maruyama, T., Shimizu, T. **Society of Automotive Engineers.** [Special Publication] SP **2004**, SP-1847, 37.

[20] Câmara, J. (2006). **Monitoramento eletrônico da mistura ar / combustível em motores de combustão interna ciclo Otto.** 171 p. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA.

[21] Sachs, I. **The energetic revolution of the 21st Century**. *Estud. av.* [online]. 2007, vol.21, n.59, pp. 21-38. ISSN 0103-4014.

[22] Terra, H. **Como construir montar e operar uma microdestilaria de álcool combustível (etanol) de capacidade de 100 litros/dia.** Disponível em: <http://issuu.com/anselmocassiano/docs/fabrica_de_alcool_combustivel> Acesso em: 02 de Abril de 2010.

[23] Andrade, E., Carvalho, S., Souza, L. (2009). **Programa do Proálcool e o etanol no brasil.** ENGEVISTA, V. 11, n. 2. p. 127-136, dezembro 2009. Disponível em: <http://www.uff.br/engevista/2_11Engevista6.pdf > Acesso em: 02 de Abril de 2010.

[24] APENA. Associação de Profissionais de Educação do Norte Alentejo. **O Poder Calorífico.** Floresta.com. Disponível em <http://www.apena.rcts.pt/aproximar/floresta/recursos/arvore_madeira/caderno3_3.htm> Acesso em: 09 de Maio de 2010.

[25] Souza, E. (2003). **Álcool e Gasolina. Fórum 4X4** Brasil. Disponível em: <http://www.4x4brasil.com.br/forum/showthread.php?t=96> Acesso em: 02 de Abril de 2010.

CAPÍTULO X

FONTES E TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA ATENDIMENTO A COMUNIDADES ISOLADAS

FONTES E TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA ATENDIMENTO A COMUNIDADES ISOLADAS

Mauro Moura Severino[30]
Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira[31]

RESUMO

Até os dias atuais, os sistemas elétricos convencionais não conseguiram garantir o suprimento sustentável de energia elétrica a todos os habitantes do planeta, em especial àqueles que vivem em comunidades isoladas, nas quais não há a possibilidade de alimentação elétrica por conexão a rede elétrica de distribuição existente. Esse fato, associado ao enorme avanço tecnológico dos últimos anos, abriu razoável espaço para a expansão da geração distribuída (GD), que tem como um de seus principais focos o fornecimento de energia elétrica a quem ainda não tem acesso a ela. No Brasil, que tem relevante parcela de sua população ainda sem suprimento de energia elétrica, a discussão acerca desse tema é imprescindível. A necessidade de se minimizarem os custos de geração conduz à exploração de fontes que utilizem recursos naturais renováveis abundantes e gratuitos, como é o caso, em muitas regiões do Brasil, da radiação solar e da água. Reconhecendo isso, este capítulo apresenta e discute as tecnologias de geração de energia elétrica, para atendimento a essas comunidades, que envolvem geração fotovoltaica e geração por meio de célula a combustível, usuárias da radiação solar e do gás hidrogênio obtido por meio da hidrólise da água.

Palavras-chave: Geração distribuída, Comunidades Isoladas, Geração Fotovoltaica, Célula a Combustível, Hidrogênio.

10.1 INTRODUÇÃO

Segundo Severino (2008), a geração distribuída (GD) não está associada a nenhuma fonte primária de energia específica, renovável ou não-renovável, tradicional ou não-tradicional, nem a alguma tecnologia específica de conversão de energia da forma não-elétrica para a forma elétrica. Sendo assim, a GD pode ocorrer, em princípio, a partir de qualquer tipo de fonte primária de energia, que será utilizada em um processo de geração de energia elétrica que empregue qualquer tecnologia. No caso de sistemas híbridos, são, via de regra, utilizadas mais de uma fonte primária e/ou mais de uma tecnologia de geração. Todavia, é necessário esclarecer que algumas tecnologias de geração de energia elétrica estão inequívoca e definitivamente vinculadas a uma única fonte primária de energia, como é o caso dos painéis

[30] Universidade de Brasília – UnB/FT/ENE/GSEP. *E-mail*: mauroseverino@ene.unb.br
[31] Universidade de Brasília – UnB/FT/ENE/GSEP. *E-mail*: mago@ene.unb.br

fotovoltaicos, que sempre gerarão energia elétrica pela conversão da energia proveniente da radiação solar.

Alguns autores sintetizam informações que permitem comparações entre as diferentes formas de GD. Essas informações permitem o início da discussão relativa ao assunto e a visualização mais abrangente de muitas dessas formas, conforme exemplos a seguir.

Na literatura especializada da área, são citadas, com diferentes classificações, diversas fontes primárias de energia e tecnologias passíveis de serem utilizadas para a GD, que incluem: pequenas turbinas a gás, motores recíprocos associados a geradores síncronos ou de indução, energia geotérmica, pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), energia eólica, energia solar-fotovoltaica, energia solar-térmica, células a combustível, armazenamento em baterias, capacitores, volantes de inércia[32] e supercondutores, microturbinas a gás, co-geração, heliotérmica, energia dos oceanos, energia das marés, energia das ondas, motores *stirling*, turbinas a gás convencional, motores alternativos de combustão interna, motores de combustão interna, gás natural, biomassa, biogás, biodiesel, hidrogênio e, é claro, todos os sistemas híbridos que resultarem da combinação de mais de uma das anteriores.

O quadro 01 (R.W. Beck & DISTRIBUTED UTILITIES ASSOCIATES *apud* RODRÍGUEZ, 2002) apresenta diversas tecnologias associadas a fontes de combustível e ao modo de conexão com a rede elétrica, classificando-as quanto ao porte. O quadro 02, por sua vez, apesar de não tratar especificamente de GD, traz informações relativas ao que os respectivos autores consideram fontes alternativas de energia elétrica, o que permite comparar diversas características delas.

Apenas com esses exemplos, fica fácil constatar-se que é muito grande a quantidade de informações importantes a serem analisadas para o bom entendimento acerca desse assunto, haja vista a enorme diversidade de possibilidades de combinação entre fontes de energia e tecnologias.

[32] Volantes de inércia são dispositivos mecânicos que, uma vez postos e mantidos em rotação, armazenam energia cinética que, em momento oportuno, é convertida em energia elétrica por meio do acionamento de geradores elétricos rotativos.

Quadro 01: Classificação de Tecnologias de Emprego Comum em GD

Tecnologia	Fonte de combustível	Interface	Pequeno < 100 kW	Intermediário 100 kW – 1 MW	Grande > 1 MW
Pequenas turbinas a gás	Combustível fóssil e biogás	Conexão direta			**X**
Motores recíprocos com geradores síncronos ou de indução	Combustível fóssil e biogás	Conexão direta	**X**	**X**	**X**
Geotérmica	Renovável	Conexão direta		**X**	**X**
PCHs	Renovável	Conexão direta		**X**	**X**
Eólica	Renovável	Inversor	**X**	**X**	**X**
Fotovoltaica	Renovável	Inversor	**X**	**X**	
Células a combustível	Combustível fóssil e renovável	Inversor	**X**	**X**	**X**
Solar-térmica	Renovável	Conexão direta	**X**	**X**	**X**
Armazemento em baterias	Rede elétrica	Inversor	**X**	**X**	**X**
Armazenamento em capacitores	Rede elétrica	Inversor	**X**	**X**	
Armazenamento em volantes de inércia	Rede elétrica	Inversor		**X**	**X**
SMES[a]	Rede elétrica	Inversor		**X**	**X**
Microturbinas	Combustível fóssil	Inversor	**X**	**X**	

Fonte: RODRÍGUEZ, 2002. (modificado)
(a) SMES é a sigla de *superconducting magnetic energy storage* – armazenamento de energia magnética em supercondutor.

Outros autores tentam classificar a GD sob o foco da associação entre fonte primária de energia e tecnologia empregada, produzindo diagramas como o mostrado na Figura 01, apresentada por El-Khattam e Salama (2004), que adiciona, aos aspectos já citados, o da tradição. Diagramas desse tipo são muito úteis no entendimento completo de um determinado projeto de GD: no caso em tela, os autores afirmam ter interesse em focar as microturbinas e as células a combustível. Todavia, para se fazer uma classificação global, envolvendo todos os tipos de fontes e de tecnologias, esse tipo de diagrama apresentaria muitos senões e restrições, como exemplificado na Figura 01, ou se tornaria tão grande e complexo a ponto de inviabilizar a sua utilização.

Em razão disso, Severino (2008) classificou a GD quanto a fontes e tecnologias de forma separada e, quanto às tecnologias, de modo bem mais simples que o proposto na Figura 01,

pois essa complexidade, via de regra, não traz benefícios. Na Figura 01, as siglas vinculadas a células a combustível designam tecnologias diferentes desse equipamento, que serão descritas posteriormente.

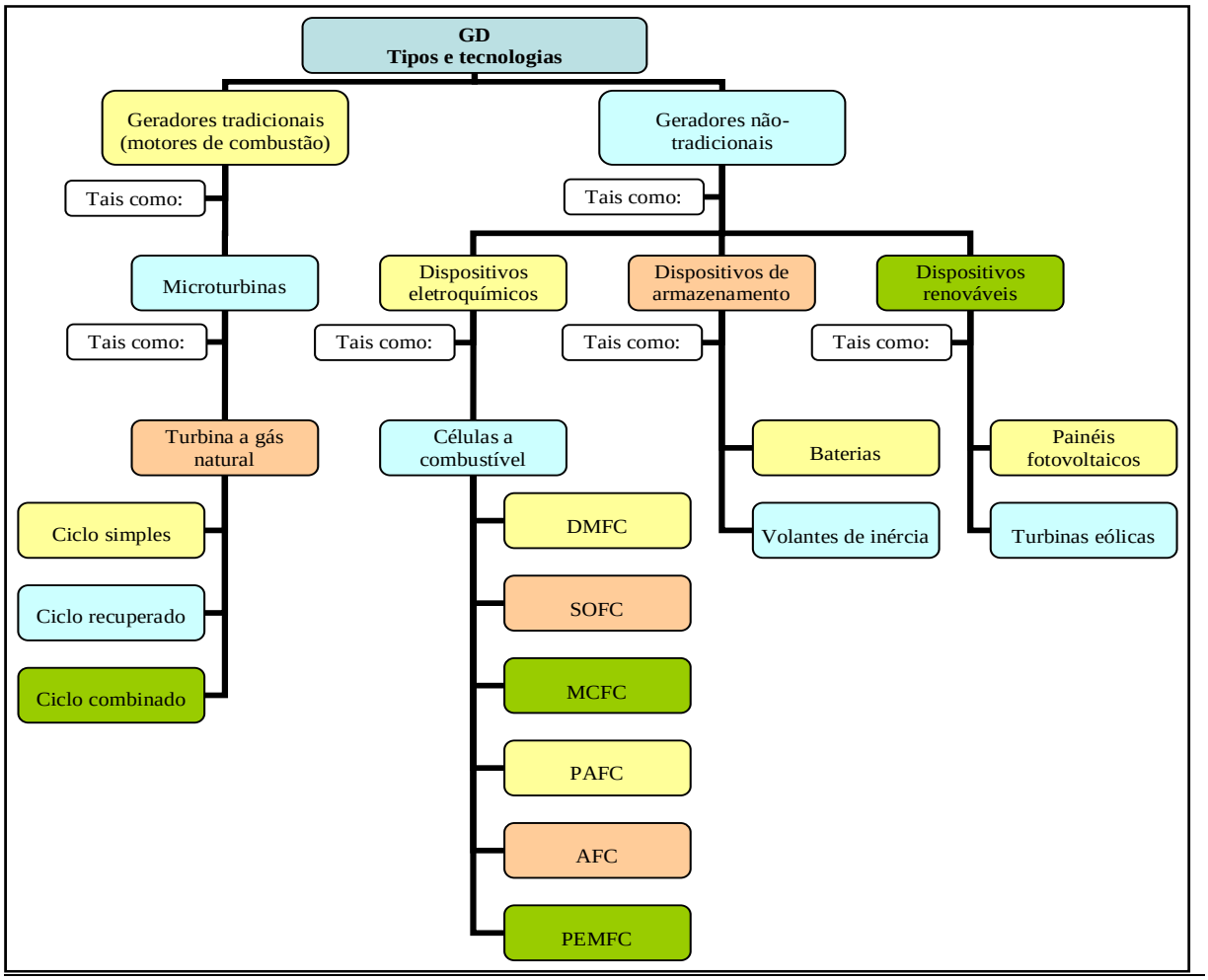


Figura 01: Classificação de GD quanto a Tipos e Tecnologias
Fonte: EL-KAHATTAM e SALAMA, 2004. (modificada).

Considerando toda essa diversidade, foi feita a opção de se descrever aqui, com detalhamento suficiente, apenas as formas de GD que envolvem geração fotovoltaica e geração por meio de célula a combustível. Isso se justifica pelo fato de que, em comunidades isoladas, sem possibilidade de alimentação elétrica por conexão a rede elétrica de distribuição existente, é relevante estudar a possibilidade de atendimento por meio de fontes alternativas com suprimento abundante, como é o caso, em muitas regiões do Brasil, da radiação solar e da água, insumo essencial para a obtenção, por meio da hidrólise, do gás hidrogênio a ser utilizado nas células a combustível.

Quadro 02: Comparação das Características das Fontes Alternativas de Energia Elétrica

Avaliação	Solar-térmica	Fotovoltaica	Hidrelétrica	Eólica	Oceânica (térmica)	Oceânica (marés)	Geotérmica
Investimento de capital	Alto	Alto	Muito alto	Moderado	Muitíssimo alto	Muito alto	Baixo
Custo operacional	Moderado	Moderado	Muito baixo	Baixo	Desconhecido	Muito pequeno	Pequeno
Eficiência	15%	5% – 10%	80%	42%	7%	25%	100%
Poluição	Nenhuma	Calor	Nenhuma	Visual	Nenhuma	Nenhuma	Baixa
Custo nivelado[a]	US$ 0,25/kWh	US$ 0,16/kWh	US$ 0,04/kWh	US$ 0,04/kWh a US$ 0,05/kWh	Desconhecido	Desconhecido	Baixo
Impacto ambiental	Moderado	Alto	Muito alto	Baixo	Desconhecido	Moderado	Baixo
Alta escala	Muito caro	Muito caro	Já comprovado	Possível	Possível	Alguns locais	Alguns locais
Baixa escala	Não	Difícil	Baixa queda	Sim	Não	Não	Não
Capacidade unitária	1.000 MW	Depende da área	2.000 MW a 6.000 MW	Variável	Sem limite	250 MW	1.000 MW

Fonte: REIS, 2001. (modificado).
(a) O custo novelado aqui informado é o custo da energia calculado com base no custo anual nivelado, que considera o tempo de construção e o período de vida útil do empreendimento e a taxa de juros utilizada para a consideração do efeito do dinheiro no tempo.

10.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

10.2.1 Aspectos Gerais da Energia Solar

A energia do Sol é originada em sucessivas reações de fusão nuclear. Segundo informado por Shayani (2006), a cada segundo, aproximadamente 6×10^{11} kg de H_2 são convertidos em He, com consumo aproximado de massa de 4×10^9 kg e com liberação energética de 4×10^{20} J. De toda essa energia, cerca de 99% são emitidos na forma de radiação eletromagnética, sendo que cerca de 9% são de radiação ultravioleta, 40% localizam-se na região visível do espectro e cerca de 50% são de radiação infravermelha, com comprimentos de onda que variam entre 0,2 μm e 3,0 μm (HINRICHS e KLEINBACH, 2003). Sabendo que a massa total do Sol é de aproximadamente 2×10^{30} kg, a projeção para a sua vida útil é de, no mínimo, 10 bilhões de anos (SZE *apud* SHAYANI, 2006), o suficiente para se considerar, ainda por muito tempo, o Sol como fonte inesgotável de energia e sem nenhum risco de contingenciamentos técnicos, econômicos, militares e/ou políticos.

A Terra tem raio médio de 6.400 km, com superfície de interceptação da luz solar de aproximadamente $1{,}28 \times 10^8$ km^2 e recebe, permanentemente sobre a superfície iluminada, $1{,}748 \times 10^{11}$ MW. Com isso, anualmente, cerca de $1{,}531 \times 10^{18}$ kWh de energia solar atingem a Terra. Essa energia corresponde a mais de 102.000 vezes o consumo mundial de energia elétrica, considerando-o igual a $1{,}50 \times 10^{13}$ kWh/ano — correspondente ao consumo mundial de eletricidade em 2005 (SEVERINO, 2008; MME, 2008b)[33] —; e corresponde a mais de 16.600 vezes o consumo mundial de energia, considerando-o igual a $9{,}20 \times 10^{13}$ kWh/ano — correspondente ao consumo mundial de energia em 2005 (SEVERINO, 2008; MME, 2008b). Isso significa dizer que, a cada 6 min, a Terra recebe energia solar equivalente a todo o seu consumo anual de energia elétrica e que, a cada 32 min, a Terra recebe energia solar equivalente a todo o seu consumo anual de energia (SEVERINO, 2008). A radiação solar incidente sobre a Terra a cada período de três dias está associada à energia equivalente à armazenada em todas as fontes conhecidas de energia fóssil, como o petróleo, o gás natural e o carvão (ALDABÓ, 2002).

[33] Segundo MME (2008b), em 2005, o consumo mundial de energia foi igual a 7.912×10^6 tep (toneladas equivalentes de petróleo), dos quais 16,3% foram consumidos na forma de eletricidade, ou seja, $1.289{,}66 \times 10^6$ tep. Nesse relatório, foram utilizadas as seguintes relações: 1 tep = 11,63 MWh e 1 MWh = 0,086 tep.

Com todo esse potencial, é possível que sejam concebidos sistemas de geração de energia elétrica que não sejam dependentes dos recursos fósseis e que utilizem somente a radiação solar como fonte energética, seja de forma direta, obtida diretamente dos raios solares, seja de forma indireta, pelo uso de ondas, marés, ventos, força hidráulica e materiais de origem vegetal, como a biomassa, que são produzidos pelo Sol no processo da fotossíntese.

Uma vez na atmosfera terrestre, a radiação solar incidente no limite superior desta sofre, no percurso até o solo, os efeitos cumulativos de reflexões, dispersões e absorções, provocados por flutuações climáticas.

A incidência total da radiação solar sobre um corpo localizado no solo é a resultante da soma das componentes direta, difusa e refletida da radiação. Radiação direta é aquela que provém diretamente do disco solar sem ocorrência alguma de mudança de direção dos raios solares que não seja a ocasionada pela refração atmosférica. Radiação difusa é a recebida por um corpo após a direção dos raios solares ser alterada por reflexões nas nuvens ou espalhamento na atmosfera. Por sua vez, radiação refletida, ou albedo, é aquela recebida por um corpo após reflexão dos raios solares em superfícies adjacentes de prédios, árvores ou solos, sendo bastante dependente da forma e da textura da superfície refletora (REIS, 2003; TIBA, FRAIDENRAICH e BARBOSA, 1999). A Figura 02 mostra as componentes da radiação solar.

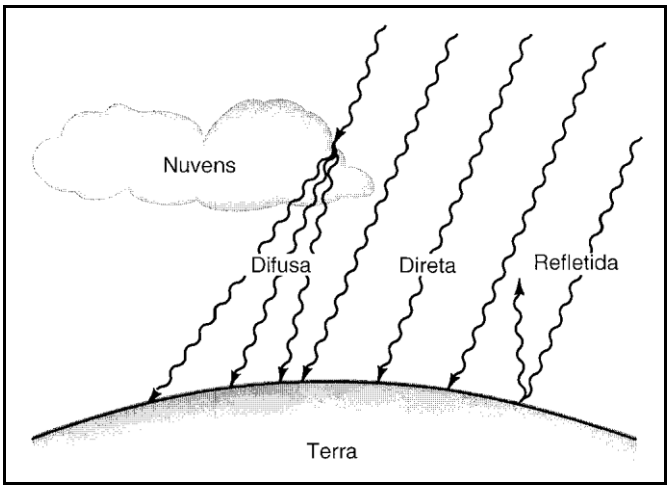


Figura 02: Componentes da Radiação Solar.
Fonte: HINRICHS e KLEINBACH, 2003.

Em razão disso, os níveis de radiação solar em um plano horizontal na superfície da Terra sofrem influência de vários fatores, que incluem: (a) as estações do ano, em razão da alteração da inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano da órbita em torno do Sol; (b) características da região em que o plano se encontra, tais como a latitude, as condições meteorológicas e a altitude (SEVERINO, 2008).

Existem instrumentos adequados à medição da radiação solar. O piranômetro é o instrumento mais utilizado na medição da radiação total, pois tem o sensor localizado no plano horizontal e recebe, então, radiações provenientes de todas as direções no hemisfério de atuação. Para a medição da radiação direta, utiliza-se o piro-heliômetro, instrumento provido de um dispositivo de acompanhamento do Sol e de um sistema ótico que admite apenas a energia proveniente do disco solar e de um estreito anel adjacente (REIS, 2003).

Em virtude da natureza estocástica da radiação solar incidente na superfície terrestre, é conveniente que se baseia em estimativas e previsões relativas à radiação solar em informações solarimétricas obtidas durante prolongados períodos de tempo. Os dados solarimétricos são apresentados habitualmente sob a forma de energia coletada ao longo de um dia, produzindo uma média mensal ao longo de muitos anos. Nesse contexto, o langley[34] apresenta-se como unidade importante, e as unidades de medição mais freqüentes são langley/dia (Ly/dia), cal/(cm^2.dia) e Wh/(m^2.dia). Normalmente, a intensidade média diária é medida em W/m^2, sendo que 1 Ly/dia ≈ 11,622 Wh/(m^2.dia) ≈ 0,48425 W/m^2.

Segundo Palz (2002), em condições atmosféricas ótimas — céu claro sem nuvem alguma —, a insolação máxima observada ao meio-dia em um local situado ao nível do mar é de 1 kW/m^2. Esse valor atinge 1,05 kW/m^2 a 1.000 m de altura e, nas altas montanhas, chega a 1,1 kW/m^2. Fora da atmosfera, essa intensidade eleva-se para 1,366 kW/m^2, sendo denominada **constante solar**. Trata-se de um valor médio, porque ela varia com a trajetória da Terra em torno do Sol. Além disso, a radiação solar total incidente varia de um local para outro na superfície terrestre. Enquanto uma superfície horizontal no sul da Europa ocidental recebe a média anual de 1.500 kWh/m^2 e, no norte, a média anual varia entre 800 kWh/m^2 e

[34] O langley (Ly) é uma unidade internacional utilizada para medir a radiação solar, ou insolação, assim denominada em 1947, em homenagem póstuma a Samuel Pierpont Langley (1834 – 1906), astrônomo, físico e inventor americano (Wikipedia, 2007). Um langley é exatamente igual a uma caloria termoquímica por centímetro quadrado: 1 Ly = 1 cal/cm^2. No Sistema Internacional de Unidades, 1 Ly = 41.840 J/m^2. Logo, 1 kWh/m^2 ≈ 86,042 Ly e 1 Ly ≈ 11,622 Wh/m^2.

1.200 kWh/m^2, uma superfície no deserto do Saara recebe cerca de 2.600 kWh/m^2, em média, por ano, o que representa o dobro da média européia.

O Brasil possui ótima radiação solar, principalmente no nordeste. Na região do semi-árido nordestino estão os valores mais altos de radiação, que chegam à faixa de 200 W/m^2 a 250 W/m^2 de potência contínua, o que equivale à faixa de 1.752 kWh/m^2 a 2.190 kWh/m^2 por ano de radiação incidente. Com isso, o local pode ser considerado uma das regiões do planeta com maior potencial de geração elétrica a partir da energia solar (SEVERINO, 2008).

10.2.2 Energia Solar-fotovoltaica

A geração de energia elétrica a partir da energia solar pode ocorrer de duas formas: (a) indiretamente, por meio do uso do calor para gerar vapor que, expandindo-se em turbina a vapor, aciona um gerador elétrico em uma usina termelétrica — constituindo os sistemas termossolares; (b) diretamente, por meio do uso de painéis fotovoltaicos — constituindo os sistemas fotovoltaicos. Com isso, é importante ressaltar que, no caso da energia solar, a mesma fonte de energia pode suprir duas diferentes formas de geração elétrica. No primeiro caso, diferentes tecnologias poderiam ser utilizadas para gerar eletricidade em processo termelétrico. No segundo caso, apenas uma tecnologia habilita-se para tal: os painéis fotovoltaicos; sendo assim, esta última situação dispensa a diferenciação terminológica entre fonte e tecnologia, que serão simplesmente denominadas doravante tecnologia. A grandeza básica para o aproveitamento da energia solar é a radiação solar incidente no sistema de geração elétrica, seja ele termossolar ou fotovoltaico (SEVERINO, 2008).

Segundo registram Reis e Silveira (2001), o uso da energia solar para geração termelétrica ainda é pouco utilizada, mesmo em centrais de porte razoável, principalmente nos Estados Unidos da América (EUA). Por sua vez, a geração solar-fotovoltaica tem tido muito mais aplicação, mesmo que em instalações de menor porte, não apenas nos países desenvolvidos, como EUA, Japão e Alemanha, mas também nos países em desenvolvimento, principalmente para o suprimento de eletricidade para pequenos sistemas isolados, em projetos-piloto e na eletrificação de equipamentos solitários, tais como radares e retransmissores de microondas. Embora o custo inicial desta tecnologia ainda não seja muito estimulante, mostra forte tendência de diminuição com a evolução tecnológica e com a produção em larga escala. Apesar da enorme divergência dos autores quanto a esse assunto, Reis e Silveira (2001)

acreditam que a geração solar-fotovoltaica pode ser considerada a forma não-tradicional de geração de eletricidade mais atraente para o Brasil e para o mundo no médio e no longo prazos, provavelmente em razão da grande disponibilidade de radiação solar no planeta e pela expectativa de grande redução no custo dos empreendimentos de geração fotovoltaica.

Ainda com relação ao custo da tecnologia, Scheer (2002) afirma, categoricamente, que se deve produzir, sem demoras nem limitações, o progresso da energia solar, não obstante todas as considerações econômicas, pois a demora implicará custo social maior que o custo para tornar realidade as energias e matérias-primas solares; quanto mais rapidamente às energias e matérias-primas solares substituírem as fósseis, maior será a economia para a sociedade, que não terá de custear as reparações de catástrofes fósseis, sejam por danos causados por furacões, inundações ou guerras energéticas, sejam por gastos crescentes devido à eliminação de resíduos ou devido ao custo da crescente burocracia ambiental. O autor ainda critica a forma pela qual a sociedade moderna, tão dada ao desperdício em muitos aspectos, preocupa-se em demasia com os preços da energia, impondo-se, assim, limitações relativas a fontes energéticas que, apesar de mais caras, são também mais compatíveis com a natureza. A tabela 01, a seguir, mostra a distribuição das fontes energéticas utilizadas em 2002 e em 2005 para a geração de eletricidade no mundo.

Tabela 01: Geração de Energia Elétrica no Mundo, em 2002 e em 2005, conforme as Fontes utilizadas.

Fonte de energia	**2002**		**2005**	
	TWh de geração	**Percentual da geração total**	**TWh de geração**	**Percentual da geração total**
Carvão	6.266	38,8	7.349	40,3
Gás	3.065	19,0	3.592	19,7
Hidráulica	2.677	16,6	2.918	16,0
Nuclear	2.661	16,5	2.772	15,2
Petróleo	1.161	7,2	1.203	6,6
Outras[a]	303	1,9	401	2,2
Totais	**16.133**	**100,0**	**18.235**	**100,0**

Fonte: SHAYANI, 2006. (modificada)
(a) Outras incluem geotérmica, solar, eólica, combustíveis renováveis e resíduos.

Verifica-se que, em 2002, 81,5% da energia elétrica produzida no mundo advém da utilização de recursos fósseis — carvão, gás e petróleo — e nucleares; em 2005, esse número subiu para 81,8%. Essa constatação é coerente com a informação, também prestada pela International

Energy Agency (IEA), de que, no período de 1973 a 2005, houve aumento percentual na participação de combustíveis fósseis para a geração total de energia elétrica no mundo.

Essa tendência, que é antagônica às reconhecidas necessidades do planeta na redução da poluição ambiental e, principalmente, do efeito estufa, pode, ao menos em parte, ser explicada pelo período de crescimento pelo qual passa a economia global, com grande crescimento de muitos países emergentes. O caso brasileiro é bem mais favorável, sob esse ponto de vista, do que a média mundial, devido à existência de grande parque gerador hidrelétrico, que utiliza uma fonte primária renovável de energia. A Tabela 02 (SEVERINO, 2008), mostra a distribuição das fontes energéticas utilizadas em 2002, 2005 e 2006 para a geração de eletricidade no Brasil.

Tabela 02: Geração de Energia Elétrica no Brasil, em 2002, 2005 e 2006, conforme as Fontes utilizadas.

Fonte de energia	2002		2005		2006	
	GWh de geração	Percentual da geração total	GWh de geração	Percentual da geração total	GWh de geração	Percentual da geração total
Hidráulica	286.092	82,76	337.457	83,73	348.805	83,18
Nuclear (urânio)	13.836	4,00	9.855	2,44	13.754	3,28
Gás natural	12.406	3,59	18.812	4,67	18.258	4,36
Óleo combustível	6.207	1,80	3.013	0,75	4.206	1,00
Óleo dísel	5.630	1,63	7.598	1,89	6.547	1,56
Bagaço de cana-de-açúcar	5.360	1,55	7.661	1,90	8.357	1,99
Carvão vapor	5.327	1,54	6.352	1,58	6.730	1,61
Outras recuperações	4.184	1,21	5.513	1,37	4.255	1,01
Lixívia	3.515	1,02	4.482	1,11	5.199	1,24
Outras secundárias	1.683	0,49	1.127	0,28	1.655	0,39
Gás de coqueria	693	0,20	450	0,11	458	0,11
Lenha	677	0,20	618	0,15	876	0,21
Eólica	61	0,01	93	0,02	237	0,06
Totais	**345.671**	**100,00**	**403.031**	**100,00**	**419.337**	**100,00**

Fonte: MME – Ministério de Minas e Energia. *Balanço energético nacional (BEN) – 2003*. Brasília: MME, 2007. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 20 mai. 2007a. (modificada)
MME – Ministério de Minas e Energia. *Balanço energético nacional (BEN) – 2006*. Brasília: MME, 2007. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 20 mai. 2007b. (modificada)
MME – Ministério de Minas e Energia. *Balanço energético nacional (BEN) – 2007*. Brasília: MME, 2008. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 24 mai. 2008b. (modificada)

Verifica-se que, em 2002, quase 87% da energia elétrica gerada no Brasil proveio de fontes renováveis de energia, número que subiu para pouco mais de 87% em 2005 e, em 2006,

voltou a ficar abaixo dos 87%. De 2002 a 2005, houve aumento de 16,59% na geração total de energia elétrica, que teve contribuição substancial do aumento de 17,95% na geração hidrelétrica, em razão da melhoria das condições de hidraulicidade; de 2005 para 2006, houve aumento de 4,05% na geração total, com a contribuição do incremento de 3,36% na geração hidrelétrica (SEVERINO, 2008).

De 2002 a 2005, destaques ambientalmente positivos podem ser feitos para a redução na geração com base em fontes não-renováveis: 28,77% na geração nuclear e de 51,46% na geração à base de óleo combustível, que aumentaram de 2005 para 2006. Também, houve aumentos na geração com base em fontes renováveis, como a hidrelétrica, já citada, e a geração com base em bagaço de cana-de-açúcar, que cresceu 42,93% de 2002 a 2005 e, de 2005 a 2006, 9,08%. De 2002 a 2006, houve aumento de 47,17% na geração com base em gás natural, que, apesar de ser fonte não-renovável, é menos poluidora que os derivados de petróleo. Vale à pena ressaltar o recente conflito envolvendo o comércio de gás natural entre Brasil e Bolívia: trata-se de um exemplo em que uma fonte de energia importante sofre contingenciamento político-econômico. Finalmente, é importante destacar o enorme crescimento da geração eólica de 2002 a 2006, 288,52%, apesar de ela ser fonte de relevância muito pequena para a matriz nacional de geração elétrica (SEVERINO, 2008).

O fato de o Brasil possuir grande parte de sua geração elétrica com base em fontes renováveis de energia é conhecido há muito tempo. Também é sabido que esse percentual já foi maior que os atuais 87%, antes do racionamento de energia elétrica ocorrido em 2001 e 2002[35]. Então, resta a conclusão de que o Brasil, país de enormes potencialidades para fontes renováveis, percorreu o caminho oposto ao que era de se esperar: seguiu a tendência do restante do mundo, ao aumentar a participação de fontes não-renováveis na sua matriz energética para a geração elétrica (SEVERINO, 2008).

O contexto da introdução das termelétricas no Brasil a partir de 2001 foi marcante: os investidores praticaram uma espécie de capitalismo sem risco, pois tiveram garantia do retorno financeiro, com generosos lucros, em operação altamente subsidiada pelo governo (ALVES FILHO, 2003). Não obstante isso, as termelétricas não são a melhor solução para um

[35] O racionamento ocorreu entre junho de 2001 e fevereiro de 2002 nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste; na região Norte, ocorreu entre agosto e dezembro de 2001. Apenas a região Sul ficou formalmente fora do racionamento. Nesse período, o país experimentou, pela primeira vez em 50 anos, taxa negativa de crescimento do consumo de energia elétrica: –7,7% (Tolmasquim, 2005).

país que tem excesso de potenciais hídricos a explorar[36], além de outros diversos potenciais de energia renovável: Alves Filho (2003) chega a denominar o Brasil de a "Arábia Saudita da Energia Renovável", pelo fato de ser o país do mundo com o maior potencial hidrelétrico.

Sendo assim, o número 87% citado anteriormente deve ser avaliado considerando-se os benefícios que podem ser acrescentados pela GD. Conforme bem recorda Shayani (2006), o sistema elétrico brasileiro atual tem como base predominante a geração centralizada, o que contribui para o baixo Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) das comunidades isoladas, pois contribui para o grande número de localidades sem suprimento elétrico, para o pequeno desenvolvimento econômico na zona rural e para a grande quantidade de pessoas sem usufruir dos benefícios da energia elétrica, cerca de 15% da população brasileira, segundo Walter (2000).

Como paradoxo a ser analisado, a maior disposição em se investir na geração fotovoltaica encontra-se em países da União Européia, que não possuem os melhores índices de radiação solar. O Gráfico 01 mostra que 68% da energia gerada por meio de painéis fotovoltaicos encontra-se na União Européia, sendo a Alemanha a grande protagonista desse investimento.

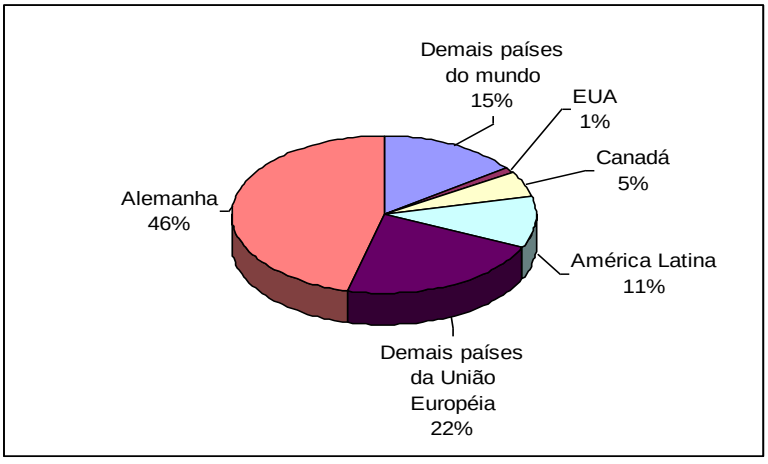


Gráfico 01: Contribuição Percentual da Geração Fotovoltaica na Geração total em 2002.
Fonte: IEA, 2005. (modificada).

É possível que a explicação disso não se encontre exclusivamente na engenharia: por trás dos grandes investimentos em tecnologia nova, promissora, e de enorme esforço em criar e divulgar uma matriz energética ecologicamente correta está, certamente, motivações

[36] Segundo MME (2008a), o potencial hidrelétrico brasileiro é estimado em 260.093 MW; todavia, até o final de 2006, havia apenas 73.434 MW implantados, cerca de 28,23% do total, e aproximadamente 5.200 MW em construção, 2% do total.

ambientais, mas, também, grandes interesses econômicos, sendo correto presumir que o país desenvolvedor da tecnologia dominante para a GD no futuro terá vantagens econômicas importantes.

A geração fotovoltaica é uma tecnologia altamente modular, com ausência quase total de emissão de poluentes e de ruídos durante o funcionamento e baixa exigência de manutenção. O gerador fotovoltaico, usualmente conhecido por arranjo fotovoltaico, é constituído por módulos fotovoltaicos que, por sua vez, são constituídos por células fotovoltaicas, responsáveis pela conversão da radiação solar em eletricidade na forma de corrente contínua (CC), conforme pode ser visto na Figura 03.

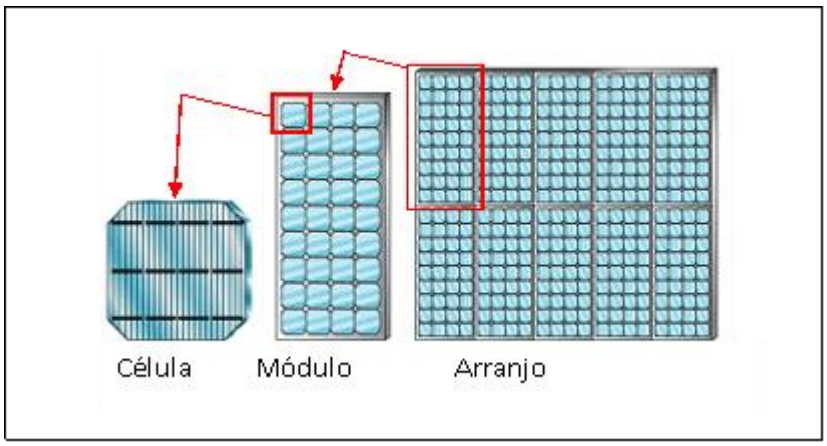


Figura 03: Modularidade dos Sistemas Fotovoltaicos: Célula, Módulo e Arranjo.

Em um mesmo módulo, as células são conectadas eletricamente em série, e a quantidade de módulos conectados em série determinará a tensão de operação do arranjo fotovoltaico em CC. A corrente do arranjo é definida pela conexão em paralelo de módulos individuais ou de *strings* — conjuntos de módulos conectados em série. A potência instalada do arranjo, usualmente especificada em CC, é dada pela soma das potências nominais individuais dos módulos.

Por causa da baixa densidade energética envolvida com essa tecnologia, ela adapta-se melhor à GD que à geração centralizada, fato que evidencia um ótimo espaço a ser ocupado por ela, principalmente em localidades com altos índices de insolação.

Nos últimos vinte anos, a geração fotovoltaica atingiu o estágio comercial, sendo utilizada tanto em áreas isoladas quanto de forma conectada a rede elétrica existente. As taxas de crescimento da produção de módulos fotovoltaicos têm sido altas, da ordem de 15% ao ano desde 1983. No entanto, as taxas verificadas nos anos de 2000 e 2001 foram excepcionalmente altas, da ordem de 40% (SEVERINO, 2008). Em 2001, a produção mundial de módulos fotovoltaicos atingiu os 401 MW, sendo que, em 2000, era de 287 MW, dos quais 172 MW no Japão. O Gráfico 02, a seguir, ilustra essa evolução.

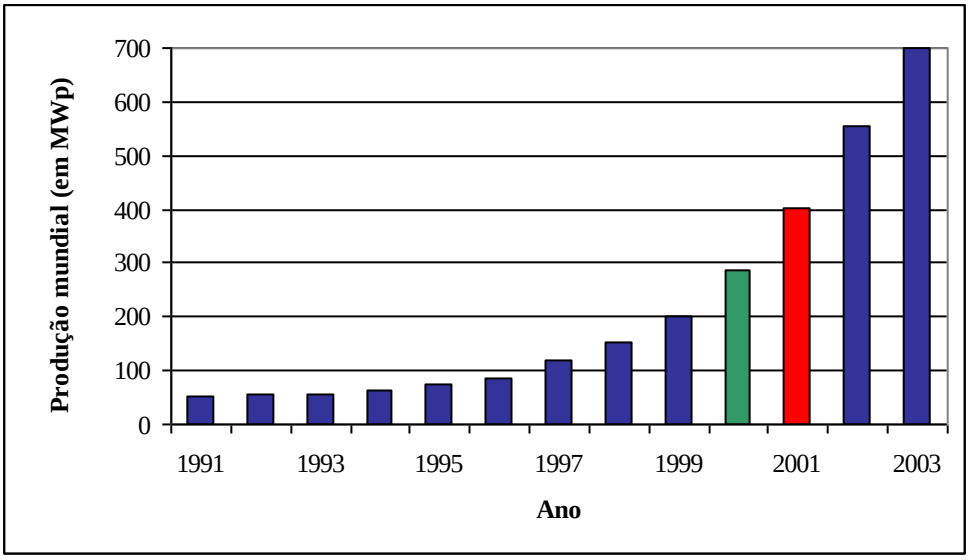


Gráfico 02: Evolução da Produção Mundial de Células e Módulos Fotovoltaicos.
Fonte: LORA e HADDAD, 2006. (modificado).

Com esse aumento de produção, os custos caíram muito: segundo Tester *et al*., (2005), a produção das primeiras células fotovoltaicas deu-se, em grande parte, em razão dos programas espaciais russo e norte-americano, e elas foram construídas ao custo de US$ 250/W; em 2003, mais de 700 MW de células fotovoltaicas foram fabricadas ao custo aproximado de US$ 2,50/W, o que representa uma redução de 100 vezes no preço das células fotovoltaicas.

Os sistemas fotovoltaicos que são instalados sem conexão a nenhuma rede elétrica, denominados sistemas fotovoltaicos autônomos, usualmente utilizam algum sistema auxiliar de armazenamento de energia, normalmente baterias, para manter o fornecimento total ou parcial de energia em períodos de radiação solar insuficiente ou inexistente. Esse tipo de sistema tem sido utilizado para a alimentação de instalações isoladas, possibilitando vários projetos sociais, agropastoris, de irrigação e de comunicações. As características positivas dos

sistemas fotovoltaicos, que incluem a modularidade, os baixos custos de manutenção, a longa vida útil e, principalmente, a disponibilidade de longo prazo e a gratuidade da utilização da fonte primária de energia, tornam esses sistemas de grande relevância para as instalações isoladas (SEVERINO, 2008). As três figuras a seguir, obtidas em DOE (2007) mostram aplicações de sistemas fotovoltaicos alimentando instalações isoladas. A Figura 04 mostra um sistema utilizado para bombeamento de água na zona rural do estado do Wyoming, nos EUA; a Figura 05 mostra um sistema fotovoltaico portátil altamente tolerante a baixas temperaturas que opera na região da Antártica provendo iluminação de segurança para pouso de aviões de carga; a Figura 06 mostra um sistema fotovoltaico instalado em um centro de saúde de uma pequena vila na Índia, provendo eletricidade para refrigeradores contendo remédios e vacinas, para iluminação e para outras necessidades importantes. Mais recentemente, os sistemas fotovoltaicos são utilizados de forma integrada à rede elétrica, operando como usinas geradoras em paralelo com as usinas convencionais. Nesse caso, dispensa-se o sistema de armazenamento energético — evitando-se o seu elevado custo e a manutenção necessários —, pois, pelo fato de os sistemas estarem conectados à rede elétrica, nos períodos de radiação solar insuficiente ou inexistente, a rede convencional supre a demanda da instalação. Nesse caso, a conexão à rede é feita por meio de inversores de potência, que devem satisfazer a diversas exigências de qualidade da energia e de segurança para que não afetem negativamente a rede à qual estão conectados (SEVERINO, 2008).

Figura 04: Sistema para Bombeamento de Água.

Figura 05: Sistema para

Figura 06: Sistema para Centro de Saúde.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica podem ser classificados em dois grandes grupos: **(a)** os que estão integrados arquitetonicamente às edificações, como, por exemplo, no telhado ou na fachada de um prédio, estando localizados junto ao ponto de consumo, total ou parcial, da energia gerada; e **(b)** os que estão instalados de forma centralizada em determinado local, como em uma usina geradora convencional, estando localizada a certa distância dos consumidores, aos quais se conectam por meio de linhas elétricas de transmissão e/ou de distribuição.

10.2.3 O Efeito Fotovoltaico

O efeito fotelétrico, fotoelétrico ou, ainda, fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, físico francês, em 1839, consiste no surgimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz incidente. A célula fotelétrica, ou fotovoltaica, é a unidade fundamental do processo de conversão. Em 1954, nos laboratórios Bell, foi produzida a primeira célula solar de silício, que rapidamente atraiu o interesse do programa espacial norte-americano, devido à sua vantajosa relação entre potência e unidade de peso. Com o aperfeiçoamento nas aplicações espaciais, a tecnologia fotovoltaica espalhou-se para as aplicações terrestres (PATEL *apud* SHAYANI, 2006).

Apresenta-se, a seguir, um breve relato, feito por Severino (2008), que, recordando alguns aspectos relativos à constituição da matéria, permite o entendimento do modo de operação de uma célula fotovoltaica.

Os elementos químicos possuem prótons e nêutrons concentrados no núcleo do átomo e elétrons que permanecem em órbitas de diferentes níveis de energia ao redor do núcleo: a permanência nas órbitas mais internas, mais próximas do núcleo, exige menos energia dos elétrons que a permanência nas órbitas mais externas.

Cada átomo do elemento silício, cujo número atômico é 14, possui 14 elétrons distribuídos em três órbitas ao redor do seu núcleo, sendo dois elétrons na órbita mais interna, oito elétrons na órbita intermediária e quatro elétrons na órbita mais externa. Os elétrons da órbita mais externa do átomo interagem com os átomos vizinhos, formando estruturas sólidas. Cada átomo faz uma ligação covalente com cada um de outros quatro átomos vizinhos, permitindo

que os quatro átomos passem a ter suas órbitas externas completas, com oito elétrons cada, formando uma estrutura cristalina.

Cada uma dessas ligações covalentes entre os elétrons de diferentes átomos pode ser quebrada se um dos elétrons receber energia externa suficiente para se afastar mais do seu respectivo núcleo, livrando-se da atração deste. Com isso, o elétron deixa a banda de valência, em que não pode se movimentar livremente, passando para a banda de condução. A saída do elétron da banda de valência deixa uma lacuna elétrica, o que cria o par elétron-lacuna, originado a partir do aumento da energia do elétron.

Se esse elétron livre, com bastante energia, fosse direcionado para um circuito elétrico, seria, então, criada uma corrente elétrica. Porém, na situação em tela, em que o material é composto apenas por átomos de silício, isso não ocorre, pois o elétron livre imediatamente associa-se a uma lacuna originada pela saída de outro elétron, ocasião em que perde energia, deixa a banda de condução e retorna à banda de valência sem dirigir-se a uma carga externa. A energia perdida pelo elétron é transformada em calor e dissipada. Então, para que se produza a desejada corrente elétrica, é necessário que haja um processo que acelere os elétrons livres para fora do material, para um circuito externo. Isso pode ser realizado com a aplicação de um campo elétrico. O material das células fotovoltaicas é preparado de forma a possuir um campo elétrico permanente, que é gerado por meio da adequada dopagem do material semicondutor (SHAYANI, 2006).

Quando átomos com cinco elétrons de ligação na última camada de valência, como, por exemplo, o fósforo, são adicionados ao silício, que possui apenas quatro elétrons nessa situação, a estrutura cristalina é constituída da seguinte forma: quatro elétrons do fósforo unem-se a quatro átomos de silício vizinhos, enquanto o quinto elétron do fósforo não realiza nenhuma ligação, permanecendo ligado ao seu átomo de origem por meio de uma ligação bastante fraca, de pouca energia. Se este elétron receber pouca energia térmica, disponível mesmo à temperatura ambiente, a ligação dele com o núcleo é quebrada, e ele é liberado e direcionado para a banda de condução. Nesse caso, o fósforo é um material dopante doador de elétrons, denominado dopante *n*; essa dopagem é denominada dopagem do tipo *n*.

Em outra configuração, se forem adicionados ao silício átomos com apenas três elétrons na última camada de valência, como, por exemplo, o boro, uma das ligações com os quatro

átomos de silício vizinhos não será realizada, restando uma lacuna. De modo análogo ao caso anterior, com pouca energia térmica, um elétron vizinho pode passar a esta posição, criando, no local de sua saída, uma nova lacuna, fazendo com que a lacuna se desloque de um local para outro. Sendo assim, o boro é um material dopante que aceita elétrons, denominado dopante *p*; essa dopagem é denominada dopagem do tipo *p*.

Mesmo com dopagem, o silício continua com carga neutra, pois a quantidade de elétrons e de prótons é a mesma. Entretanto, quando o silício do tipo *n* é posto em contato com o silício do tipo *p*, os elétrons livres do material com dopagem do tipo *n* preenchem as lacunas do material com dopagem do tipo *p*. Logo, a camada do tipo *n*, que cedeu elétrons, fica positivamente carregada; a camada do tipo *p*, que recebeu elétrons, fica negativamente carregada. Essas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons da camada *n* para a camada *p*. Este processo alcança equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira de potencial capaz de impedir o fluxo dos elétrons livres remanescentes no lado *n*. Está criada a junção *pn*.

Nessa situação, o efeito fotelétrico pode ocorrer. Quando um elétron da camada *p* recebe energia externa suficiente do fóton da luz solar incidente na junção *pn*, ele move-se para a banda de condução e cria o par elétron-lacuna. O campo elétrico existente força o deslocamento desse elétron para a camada *n*, não permitindo o seu retorno, e, simultaneamente, repele a lacuna para o extremo oposto da camada *p*. Criada a condição de circulação de corrente elétrica no interior do material semicondutor dopado, a simples colocação de contatos elétricos nas duas extremidades do material permite à tensão elétrica existente entre elas originar corrente elétrica, que produzirá os efeitos desejados na carga externa.

10.2.4 O Aproveitamento da Luz Solar

Nos semicondutores, entre a banda de valência e a banda de condução, há uma banda proibida, em que não pode haver elétrons nem lacunas. Sendo assim, para que um elétron vá da banda de valência para a banda de condução, ele deve receber energia externa suficiente para vencer a banda proibida. No caso do efeito fotovoltaico, o fóton deve fornecer ao elétron a energia suficiente para isso (SEVERINO, 2008).

Os fótons com energia inferior à necessária para que o elétron atravesse a banda proibida não são absorvidos, passando diretamente através do material semicondutor. Já os fótons com energia superior à necessária para a citada finalidade são absorvidos, fornecendo ao elétron exatamente a energia necessária e transformando o excesso energético em calor. A passagem direta dos fótons, sem absorção energética, pelo semicondutor e a transformação em calor de parte da energia dos fótons representam perdas de eficiência que ocorrem na conversão da energia da radiação solar em eletricidade nos painéis fotovoltaicos (SHAYANI, 2006).

Os fótons predominantes na radiação solar, que inclui as cores do espectro visível, a radiação ultravioleta e a radiação infravermelha, possuem energia que variam entre 1,24 eV — limite inferior da banda de energia para a radiação infravermelha — e 6,20 eV — limite superior da banda de energia para a radiação ultravioleta. Sendo assim, é fundamental a utilização, na fabricação de células fotovoltaicas, de materiais semicondutores que possuem banda proibida com energia inferior a 1,24 eV, pois a maioria dos fótons possui energia superior a isso. Para exemplificar, seguem os valores de energia associada à banda proibida, à temperatura de 300 K, de alguns materiais utilizados na fabricação de células fotovoltaicas: silício (Si) – 1,12 eV; arsenieto de gálio (GaAs): 1,42 eV; telureto de cádmio (CdTe) – 1,56 eV (SEVERINO, 2008).

Conforme bem observado por Shayani (2006), a obtenção de rendimento elevado na absorção da energia solar é complexa: os materiais com baixo valor de banda de energia, como o silício, absorvem grande quantidade de fótons, porém boa parte da energia desses fótons é transformada em calor, por haver excesso energético; os materiais com mais alto valor de banda de energia, como o telureto de cádmio, aproveitam melhor a energia dos fótons absorvidos, havendo menos dissipação térmica, porém absorvem menor quantidade de fótons, pois deixam passar aqueles com energia inferior à sua banda.

Outro fator que influencia o desempenho na absorção de fótons pelo semicondutor é a temperatura: o aumento da temperatura do semicondutor pela exposição à radiação solar provoca a diminuição da banda de energia, o que causa maior dissipação do que em temperatura ambiente (SZE *apud* SHAYANI, 2006). Apesar de essa diminuição não ocorrer de forma linear com o aumento da temperatura, a linearização é uma boa aproximação para temperaturas entre 300 K e 600 K, fornecendo as seguintes informações: para o silício, a banda de energia é reduzida em pouco mais de 1% para cada 50 K de aumento de

temperatura; para o GaAs, a redução é de cerca de 1,5% para cada 50 K de aumento de temperatura.

Um modo de se melhorar a eficiência da absorção da radiação solar é a utilização de mais de uma junção sobrepostas, em forma de cascata, com diferentes bandas de energia. A primeira junção a receber a radiação solar absorve os fótons com mais energia; fótons menos energéticos passam direto pela primeira junção, sendo absorvidos pela segunda junção, que deixa passar fótons menos energéticos ainda, e assim por diante. Um bom exemplo disso é apresentado por Shayani (2006):

- Para um semicondutor com banda de 1,35 eV, verificou-se que a máxima eficiência é de 31%. Para esse mesmo semicondutor, o aumento da radiação solar em 1.000 vezes, elevou a eficiência para 37%. Com a utilização de duas junções em série, com bandas de 1,56 eV e 0,94 eV, a eficiência encontrada foi de 50%. Para três junções em série, com bandas de 1,75 eV, 1,18 eV e 0,75 eV, a eficiência alcançou 56%. Com mais junções, a eficiência cresce muito lentamente: para 36 bandas de energia diferentes, a máxima eficiência encontrada foi de 72%.

Mesmo com essa espécie de *saturação* do crescimento da eficiência com o aumento do número de junções em série, verifica-se que a eficiência do processo pode ser aumentada em mais de 100% com relação à eficiência com apenas uma junção, permitindo aproveitamento bem maior da energia solar disponível.

Sabe-se que Si, GaAs e CdTe, utilizados comercialmente para a fabricação de células fotovoltaicas, possuem elevado rendimento em comparação aos demais materiais. Porém, existem pesquisas em andamento com relação a células que possuem multiintervalos entre bandas, em vez de possuírem multijunções, permitindo a obtenção de 50% de eficiência com uma única junção, por meio de uma liga de zinco, manganês e telúrio (ZnMnTe), conforme registra Shayani (2006). Isso permite a conclusão de que ainda há muito progresso a ser feito para a melhoria da eficiência das células fotovoltaicas.

Aldabó (2002) sugere algumas estratégias para solucionar problemas de limitação de eficiência, listadas a seguir:

- A luz que é refletida pela superfície da célula pode ser minimizada por meio de tratamento da superfície. Conforme abordado por Shayani (2006), o silício, por exemplo, por

ser material brilhante, reflete mais de 30% da luz incidente, diminuindo a quantidade de fótons absorvidos. Duas técnicas são utilizadas para a minimização desse fator: a primeira consiste em aplicar uma fina camada de monóxido de silício (SiO) sobre a superfície da célula, reduzindo a reflexão para cerca de 10%, sendo que uma segunda camada pode reduzi-la para menos de 4%; a segunda técnica consiste em construir a superfície não-plana, mas em formato de pirâmides ou cones, de forma que a luz refletida pela lateral de uma dessas saliências incida na lateral de outra saliência, aumentando as possibilidades de absorção.

- A perda de luz refletida pelos contatos elétricos posicionados na parte frontal da célula pode ser minimizada com a utilização de contatos transparentes.
- Os elétrons e as lacunas criados pela absorção dos fótons podem recombinar-se antes de alcançarem a junção e de a corrente elétrica ser formada. Essa recombinação pode ser minimizada em materiais policristalinos e amorfos com a utilização de ligas de hidrogênio.
- A resistência elétrica no interior do semicondutor pode ser minimizada ainda na etapa de projeto.
- A quantidade de fótons que passam através do semicondutor sem colidir com algum elétron pode ser diminuída pela utilização de materiais de alto índice de absorção. Alguns tipos de filmes possuem espessura inferior a um micrômetro, com absorção de 90% da luz incidente; já células de cristal simples e de silício policristalino devem possuir espessura entre 50 μm e 150 μm para possuir absorção efetiva.

10.2.5 Tecnologias Fotovoltaicas Comercialmente Disponíveis

10.2.5.1 Aspectos Gerais

Em aplicações terrestres, dos diversos semicondutores utilizados para a fabricação de células fotovoltaicas, destacam-se, por ordem descrescente de maturidade e utilização: (a) o silício cristalino — c-Si; (b) o silício amorfo hidrogenado — a-Si:H ou, simplesmente, a-Si; (c) o telureto de cádmio — CdTe; e (d) os compostos relacionados ao disseleneto de cobre e índio e ao disseleneto de cobre, gálio e índio — $CuInSe_2$ ou CIS e $Cu(InGa)Se_2$ ou CIGS. Neste último grupo, estão elementos químicos que são altamente tóxicos — Cd, Se e Te — e/ou muito raros — Te, Se, Ga, In e Cd (RÜTHER, 2004). Isso foi um obstáculo inicial considerável à utilização mais intensiva dessas tecnologias. Acerca da toxicidade, deve-se ressaltar que isso não é característica apenas dos painéis solares de CdTe, CIS e CIGS, que, sem dúvida, deverão ter descarte apropriado; a toxicidade também é característica de outros

equipamentos elétricos de uso muito difundido, como lâmpadas fluorescentes, que contêm mercúrio, e de monitores de computador, que contêm chumbo. Quanto à raridade de alguns materiais, existe o contraponto: o Si é, sabidamente, o segundo elemento mais abundante na superfície terrestre, superado apenas pelo oxigênio, conta com mais de 25% de participação na constituição da crosta do planeta e é cem vezes menos tóxico que qualquer um dos outros elementos de interesse (SHAH *apud* RÜTHER, 2004).

O c-Si é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional e, das mencionadas anteriormente, é a única que utiliza lâminas cristalinas relativamente espessas — com diâmetro de aproximadamente 10 cm e espessura que varia de 300 μm a 400 μm. Isso representa uma limitação em termos de redução de custos de produção. As demais tecnologias baseiam-se em películas delgadas, filmes finos com espessura da ordem de 1 μm, de material semicondutor: segundo Rüther (2004), é nesse aspecto que reside o grande potencial de redução de custos que estas tecnologias detêm.

Filmes finos para aplicações fotovoltaicas, principalmente no entorno construído, estão sendo desenvolvidos por apresentarem baixos custos de produção decorrentes das pequenas quantidades de material necessárias, das pequenas quantidades de energia envolvidas em sua produção — o que diminui o tempo de *payback* de energia — e do elevado grau de automação dos processos de produção — que exige grande precisão e propicia grande capacidade de produção (RÜTHER e LIVINGSTONE, 1993).

Pelo fato de que a radiação solar incidente na superfície terrestre contém pouca densidade energética — como já mencionado, correspondente a cerca de 1 kW/m^2 em um dia ensoralado de céu sem nuvens —, quando comparada a outras fontes energéticas, os painéis fotovoltaicos, para que possam ser utilizados para a geração elétrica a preços competitivos, devem ter baixos custos (RÜTHER, 2004). Descrevem-se, a seguir, as principais características de cada uma dessas tecnologias.

10.2.5.2 Tecnologia de Silício Cristalino (c-Si)

O c-Si é a forma mais tradicional de tecnologia fotovoltaica e representa cerca de 80% dos módulos comercialmente produzidos, tendo-se consolidado no mercado por sua extrema

robustez e confiabilidade. Considerando que o custo de produção desses módulos é bastante elevado e que as possibilidades de reduzi-lo já estão praticamente esgotadas, muitos analistas consideram que essa tecnologia é pouco competitiva com formas tradicionais de geração elétrica em larga escala. No entanto, segue ainda sendo a líder entre as tecnologias fotovoltaicas para aplicações terrestres em qualquer escala, pois, nos principais mercados mundiais, Japão e Alemanha, a área ocupada por um arranjo fotovoltaico é uma limitação insuperável para as tecnologias com menor eficiência de conversão (RÜTHER, 2004).
A cristalinidade do silício indica quão perfeitamente ordenados estão os átomos da estrutura. Uma distribuição uniforme dos átomos facilita a passagem dos elétrons pela junção *pn*, ao passo que uma descontinuidade aumenta a probabilidade de o elétron recombinar-se com uma lacuna antes de participar da corrente elétrica (SHAYANI, 2006).

O silício monocristalino (m-Si) é refinado para atingir uma pureza entre 99,99% e 99,9999%. O silício de alta pureza é fundido e colocado em contato com uma *semente*, um único cristal, e, enquanto ocorre à solidificação, o silício modela-se conforme a estrutura da *semente*, possuindo uma única estrutura cristalina. Por isso, diz-se que o silício derretido está crescendo enquanto se solidifica (SHAYANI, 2006). Esse processo ocorre em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas, da ordem de cm/hora. Considerando-se que as temperaturas envolvidas são da ordem de 1.400 ºC, o consumo de energia no processo é muito intenso, elevando o tempo de retorno de energia para mais de dois anos[37], dependendo dos níveis de radiação solar da localidade de instalação dos módulos. Há diversas outras etapas complementares necessárias à fabricação do módulo fotovoltaico, em que ocorrem muitas perdas de material semicondutor (RÜTHER, 2004).

Segundo Shayani (2006), há três processos que podem ser utilizados para a formação do monocristal de silício: o método Czochralski, o mais difundido; a técnica *float-zone*; e a técnica *ribbon-growth*. Esses processos não serão aqui discutidos, pois caracterizam demasiado detalhamento para a consecução do objetivo deste trabalho.

[37] A informação aqui apresentada diverge da fornecida por alguns autores, possivelmente porque, além de serem referências diferentes, elas possuem defasagem temporal importante. Logo, com a evolução tecnológica rápida, o desempenho energético dos painéis melhorou. De fato, conforme divulgado em IEA (2008b), com informações de 2006, considerando-se a irradiação solar igual a 1.700 kWh/(m^2.ano), o tempo de retorno de energia, para o m-Si, está próximo aos 24 meses; para o p-Si, está próximo aos 21 meses; e, para o a-Si, está próximo aos 18 meses.

A fabricação do silício policristalino (p-Si) exige técnicas mais simples, resultando em menor eficiência da célula e menor perfeição cristalina que no caso do m-Si, porém com menor gasto energético, o que diminui o tempo de *payback* de energia. O material utilizado é o mesmo que para o m-Si, ou com menor grau de pureza, que é fundido e, posteriormente, solidificado direcionalmente, na forma de lingote com grande quantidade de grãos ou cristais, no contorno dos quais concentram-se os defeitos que tornam esse material menos eficiente que o m-Si em termos de conversão fotovoltaica. Os processamentos posteriores até que seja obtido um módulo fotovoltaico são semelhantes aos utilizados no caso do m-Si (RÜTHER, 2004).

Nos últimos anos, a participação do p-Si no mercado mundial tem aumentado, em detrimento do m-Si, sendo que, atualmente, mais de 50% da produção mundial recai sobre o p-Si (MAYCOCK *apud* RÜTHER, 2004). O p-Si também pode ser produzido sob a forma de tiras ou fitas — *ribbon technology* —, a partir de um banho líquido de silício. Nesse processo, fica dispensado o fatiamento em lâminas, pois as tiras de p-Si já são produzidas com a espessura final da célula (RÜTHER, 2004).

10.2.5.3 Tecnologia de Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si)

O a-Si já foi visto como a única tecnologia fotovoltaica em filmes finos comercialmente viáveis, sendo muito utilizado em produtos de consumo muito baixo, como calculadoras e relógios. Por apresentarem resposta espectral mais direcionada para a região azul do espectro eletromagnético, as células fabricadas com essa tecnologia absorvem 40 vezes mais radiação solar que o c-Si e adaptaram-se muito bem à iluminação artificial e sob a radiação difusa, predominante nos dias nublados. Com essa alta capacidade de absorção, os filmes de a-Si consomem menos de 1% da matéria prima consumida pelo c-Si, e um filme fino, de cerca de 1 μm de espessura, pode absorver até 90% da energia luminosa incidente.

O silício amorfo, por não possuir estrutura cristalina, apresenta defeitos nas ligações, o que aumenta a probabilidade de recombinação dos pares elétron-lacuna. Todavia, conforme já abordado anteriormente, esse problema pode ser minimizado com a hidrogenação, processo pelo qual os átomos de hidrogênio ligam-se aos defeitos das ligações, permitindo que os elétrons movimentem-se de modo mais fácil (ALDABÓ, 2002; SHAYANI, 2006).

Os processos de produção de a-Si, a plasma, ocorrem a temperaturas inferiores a 300 ºC, possibilitando o depósito desses filmes sobre substratos de baixo custo, como o vidro, o aço inoxidável e alguns plásticos (RÜTHER, 2004). Com isso, desenvolveram-se módulos solares comercialmente disponíveis que são flexíveis, inquebráveis, leves, semitransparentes e adaptáveis a superfícies curvas. Com estética mais atraente, o a-Si encontra aplicações arquitetonicamente mais favoráveis, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas em instalações integradas ao ambiente construído. Essa maior versatilidade ampliou o mercado fotovoltaico.

Essa tecnologia, por estar ainda no início do seu desenvolvimento, tem eficiência bastante menor que a do c-Si, o que significa que se necessita de quase o dobro da área em módulos solares de filmes finos para se obter a mesma potência instalada com painéis de c-Si. Mesmo considerando o fato de os painéis de filmes finos já terem preço inferior ao dos painéis de c-Si por unidade de potência — Wp —, a área ocupada para determinada potência instalada deve ser seriamente considerada nas análises econômicas. Sendo assim, é como material de revestimento que o a-Si leva grande vantagem sobre o c-Si, porque o custo por metro quadrado passa a ter maior importância que o custo por Wp, critério em que aquele já leva vantagem sobre este.

Neste ponto, cabe um melhor esclarecimento acerca do que é potência nominal de uma célula ou de um módulo solar fotovoltaico: é a potência de pico ou potência máxima obtida sob condições-padrão de teste (CPT). Isso explica a anexação da letra **p**, de pico, à unidade de potência. Sendo assim, têm-se: Wp e kWp (RÜTHER, 2004). As CPT, no caso, são: (a) temperatura ambiente = 25 ºC; (b) intensidade de radiação = 1 kW/m^2; e (c) espectro solar = AM 1,5 (LABOURET *et al*., 2005). AM é a sigla para a expressão de língua inglesa *air mass*, e o número 1,5 que a sucede representa quantas vezes o comprimento de ar da atmosfera, em linha reta, que a radiação solar tem de percorrer até atingir a superfície terrestre é maior que o comprimento que deveria ser percorrido se a radiação incidisse perpendicularmente à superfície. A Figura 07 permite compreender o significado da sigla AM, sendo que o número que a acompanha é igual a (1/sen(h)), em que “h” é o ângulo indicado.

O tempo de retorno de energia para o a-Si, atualmente em torno de um ano[38], é substancialmente menor que para o c-Si, principalmente por causa da menor quantidade de energia despendida na fabricação do substrato de vidro ou aço inoxidável; ademais, é pequena a potência necessária para o depósito da película delgada de a-Si sobre o substrato — da ordem de 1 kW/m^2, coincidentemente da mesma ordem de grandeza da radiação solar na superfície terrestre (RÜTHER, 2004).

Uma outra característica positiva do a-Si reside no fato de que, ao contrário de todas as outras tecnologias fotovoltaicas, o aumento da temperatura de operação não provoca redução na potência gerada (RÜTHER e LIVINGSTONE, 1993), o que é, sem dúvida, uma vantagem nas aplicações em países de clima quente, como o Brasil. Segundo Rüther (2004), o desempenho das células de a-Si integradas a edificações, situação em que os módulos atingem temperaturas elevadas pela falta de ventilação na parte posterior, em termos de energia gerada por potência instalada, em kWh/kWp, tem-se mostrado superior à das demais tecnologias em operação no Brasil.

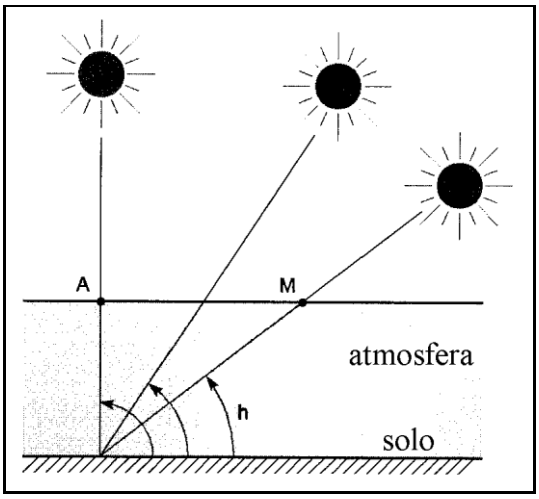


Figura 07: Esquema para a Definição de AM.
Fonte: LABOURET, 2005. (modificada).

Segundo informações do DOE, uma desvantagem do a-Si é a variabilidade de desempenho que ele apresenta quando é exposto à luz solar, pois sua potência elétrica inicial decai em até 20% antes de estabilizar-se, caracterizando o efeito denominado *Staebler-Wronski* (SHAYANI, 2006).

[38] Ver nota 8.

10.2.5.4 Tecnologia de Telureto de Cádmio (CdTe)[39]

A tecnologia fotovoltaica de CdTe também se apresenta na forma de filmes finos[40], sendo concorrente do c-Si e do a-Si para geração de potência e nas aplicações integradas a edificações. Em aplicações de baixa potência, como em calculadoras, esse material já é utilizado há mais de uma década. Para aplicações externas, apenas recentemente módulos com grandes áreas começaram a ser comercializados. Esses módulos normalmente têm a forma de placas de vidro de tom marrom ou azul escuro, representando vantagem estética com relação ao c-Si.

Analogamente ao caso do a-Si, os custos de produção do CdTe são atrativamente baixos para a produção em larga escala; logo, essa tecnologia tem grandes chances de despontar como real competidor no mercado fotovoltaico para a geração de maiores potências.

Duas desvantagens dessa tecnologia são a relativamente alta toxicidade e a baixa disponibilidade dos elementos envolvidos; é claro que essas desvantagens tornam-se mais decisivas com a ampliação da escala de produção. Por outro lado, uma boa vantagem dessa tecnologia é que ela apresenta eficiência de conversão fotovoltaica maior que a do a-Si.

10.2.5.5 Tecnologias CIS e CIGS[41]

Essas tecnologias de filmes finos também são competitivas em aplicações integradas a edificações, principalmente pelo seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas e pela ótima estética. Assim como no caso do CdTe, a pouca abundância dos elementos envolvidos e a toxicidade deles são desvantagens a serem consideradas, especialmente no caso da produção em grande escala. Dos filmes finos comercialmente disponíveis, os módulos de CIGS são os que apresentam a melhor eficiência fotovoltaica.

10.2.6 Características Elétricas de Células e Módulos Fotovoltaicos

[39] Rüther (2004).
[40] A expressão filme fino refere-se não à espessura do filme utilizado, mas ao método empregado na fabricação dele: o filme é depositado em finas e consecutivas camadas de átomos, moléculas e íons. A espessura varia entre 1 μm e 10 μm. As outras tecnologias utilizam espessura de 100 μm a 300 μm (Shayani, 2006).
[41] Rüther (2004).

Os fabricantes de células fotovoltaicas apresentam curvas características de corrente, tensão e potência, em que as grandezas mais importantes são: tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de máxima potência (V_{mp}) e corrente de máxima potência (I_{mp}). A figura 08 exemplifica curvas características de uma célula fotovoltaica.

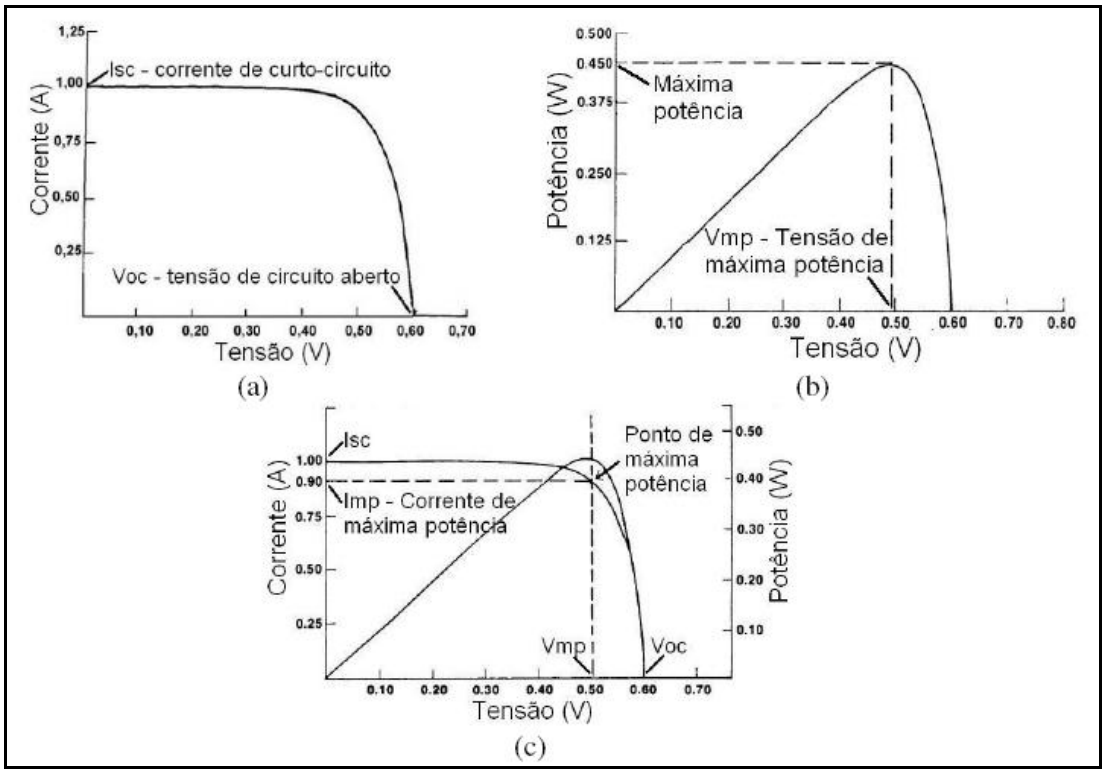


Figura 08: Curvas Características de uma Célula Fotovoltaica: (a) Curva I x V; (b) Curva P x V; (c) Parâmetro de Potência Máxima.
Fonte: SHAYANI, 2006.

Os dados de placa de uma célula ou de um módulo fotovoltaico são válidos nas CPT. Em aplicações reais, todavia, as condições são diferentes daquelas das CPT, tornando o desempenho do dispositivo diferente do esperado: a célula exposta ao sol em localidades de clima quente, dentro de um invólucro, terá temperatura superior à das CPT; de outro modo, quando a intensidade de radiação varia em função de nebulosidade, ela deixa de ser a prevista nas CPT. Com essas variações em grandezas importantes, é difícil manter a célula fotovoltaica operando no ponto de máxima potência, ponto que otimizaria a operação dela. A Figura 09 exemplifica a influência da alteração das CPT na curva $I \times V$ de um módulo fotovoltaico. Essas influências devem ser sempre consideradas, pois, por exemplo, a demasiada redução da tensão de saída do módulo para determinada corrente pode determinar o não-recarregamento das baterias que dão suporte ao módulo, no caso de um módulo com

tensão nominal de 12 V conectado a baterias chumbo-ácidas de 12 V, que exigem cerca de 14,2 V para a recarga.

10.2.7 Sistema Fotovoltaico Autônomo

10.2.7.1 Aspectos Gerais

Conforme já mencionado, um sistema fotovoltaico autônomo opera desconectado da rede elétrica. Sendo assim, ele constitui um agrupamento de equipamentos interconectados com a finalidade de gerar energia elétrica para suprir demanda não-atendida por rede elétrica convencional.

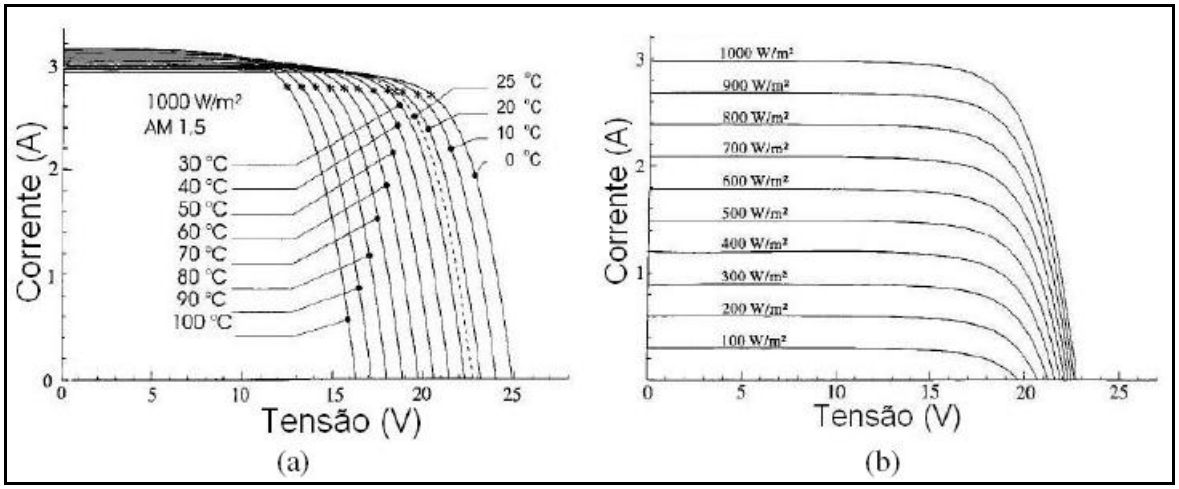


Figura 09: Influência na Curva I x V deum Módulo Fotovoltaico, da Alteração: (a) da Temperatura; (b) da Intensidade da Radiação Solar.
Fonte: SHAYANI, 2006.

Os principais constituintes de um sistema desse tipo são: (a) arranjo fotovoltaico, que é um conjunto de módulos fotovoltaicos; (b) regulador de tensão ou controlador de carga; (c) sistema de armazenamento de energia; e (d) inversor eletrônico. A Figura 10 mostra o esquema de um sistema fotovoltaico, com os componentes indicados anteriormente.

Nesse esquema, o arranjo fotovoltaico, responsável pela conversão fotovoltaica, é constituído por módulos — ou painéis — fotovoltaicos, conexões, diodos de proteção e estruturas de suporte, descritos individualmente a seguir, à exceção das diversas tecnologias existentes para a fabricação dos módulos fotovoltaicos, que já foram abordadas.

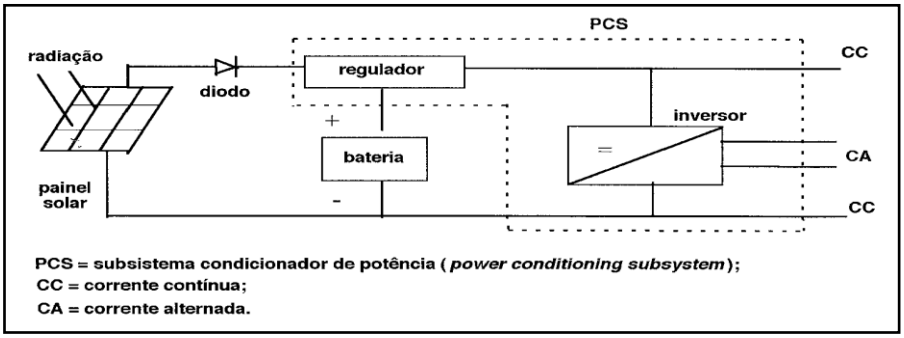


Figura 10: Esquema de um Típico Sistema Fotovoltaico Autônomo.
Fonte: REIS, 2003.

As conexões referem-se às ligações elétricas físicas entre os diversos componentes do sistema, incluindo as necessárias entre os módulos, indispensáveis para que se tenha a configuração desejada para o sistema em termos de tensão, corrente e potência nominais. Os diodos de potência são incluídos no esquema para a proteção dos módulos contra correntes reversas. Para a estrutura de sustentação dos módulos, que tem a função de agrupar os módulos e permitir a interligação deles de modo simples, usualmente utilizam-se materiais comuns, tais como madeira, aço galvanizado e alumínio. Há estruturas de sustentação que incluem, para melhorar a captação da radiação solar e a energia gerada pelo sistema, dispositivos de orientação segundo o movimento do Sol, que permitem movimento do arranjo fotovoltaico em um ou em dois eixos de rotação, com acionamento manual ou automatizado. No caso de estruturas de sustentação fixas, há a necessidade de se determinar, em função da localidade da instalação, o ângulo de inclinação da superfície de captação do arranjo fotovoltaico para otimizar a recepção da radiação solar (SEVERINO, 2008). O Quadro 03 sugere ângulos ótimos de inclinação dos módulos fotovoltaicos, com relação ao solo, em função da latitude do local da instalação.

O sistema de armazenamento de energia indicado nesse esquema é constituído de baterias eletroquímicas, o tipo mais comum e mais utilizado. As baterias são componentes estáticos que armazenam energia química e, em determinadas condições, transformam-na em energia elétrica na forma de CC em baixa tensão. Há diversos tipos de baterias eletroquímicas projetadas para o regime de operação de sistemas fotovoltaicos. As baterias chumbo-ácidas são as mais baratas e disponíveis em várias capacidades. As baterias de níquel-cádmio, muito confiáveis, têm custo elevado, proibitivo para a utilização em larga escala. As baterias automotivas podem ser utilizadas nos sistemas fotovoltaicos; entretanto, haja vista que não são projetadas para esse regime de operação, terão vida útil reduzida (REIS, 2003). No caso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, o sistema de armazenamento pode ser

dispensado, mas, caso não o seja, ele tem as mesmas funções que no caso aqui tratado. Finalmente, é imperativo ressaltar que as baterias não constituem o único tipo de sistema de armazenamento, conforme pode ser verificado no quadro 01.

Quadro 03: Ângulo de Inclinação do Arranjo Fotovoltaico em Função da Latitude

Latitude (em graus)	Ângulo do arranjo (em graus)
0 a 15	15
20	20
25	25
30	35
35	40

Fonte: FARRET, 1999.

O esquema da figura 10 mostra o subsistema condicionador de potência — da expressão inglesa *power conditioning subsystem* (PCS). O PCS faz a conexão do arranjo fotovoltaico, que é a fonte da eletricidade, com a carga, que irá consumi-la. Essa conexão pode ser feita em CC ou em CA, dependendo da necessidade da carga. O PCS é constituído por vários dispositivos, em regra, acoplados fisicamente e tem como funções: (a) controlar o acionamento, o desligamento e o ponto de operação do sistema; (b) realizar a proteção do sistema; e (c) controlar a conversão de CC/CA (REIS, 2003). Em algumas aplicações de maior tecnologia, o PCS realiza também funções de medição, supervisão e controle, local ou remotamente.

É bem fácil verificar-se que o componente mais importante do PCS mostrado na figura 10 é o inversor, equipamento eletrônico que realiza a conversão CC/CA. Há dois tipos de inversores em utilização: os comutados pela rede elétrica à qual estão conectados e os autocomutados. Nos primeiros, o processo de inversão — conversão CC/CA — é controlado pela tensão da rede elétrica; nos segundos, o controle é feito por um sinal elétrico gerado no próprio dispositivo. Sendo assim, os inversores autocomutados são mais sofisticados, pois exigem projeto eletrônico mais complexo, e, por isso, mais caro (REIS, 2003). Todavia, apesar do custo mais elevado, eles são a única opção no caso de sistemas fotovoltaicos autônomos. Para sistemas fotovoltaicos conectados ao sistema elétrico, os inversores comutados pela rede são aplicáveis. Em função da importância desses dispositivos, os fabricantes buscam desenvolver inversores de maior rendimento para altas potências, e de menor custo também, pois, para potências na faixa de 100 W a 2.000 W, existem inversores com rendimentos de até 95% (REIS, 2003).

10.2.7.2 Potência e Energia Geradas

A potência gerada por um sistema fotovoltaico depende basicamente de três fatores: (a) a radiação solar incidente no arranjo fotovoltaico; (b) a potência instalada do arranjo fotovoltaico; e (c) o rendimento de cada um dos componentes do sistema. Aqui, potência instalada do arranjo fotovoltaico é a potência captada pelos módulos fotovoltaicos durante o período de insolação máxima (ALDABÓ, 2002; REIS, 2003).

Sendo assim, a potência elétrica gerada em função do tempo por um sistema fotovoltaico com a configuração mostrada no esquema da figura 10 pode ser calculada pela seguinte equação:

$$P_{\mathrm{g}}(t) = \eta \times A \times R_{\mathrm{s}}(t) \qquad \textbf{(10.1)}$$

em que:

η é o rendimento total do sistema, calculado pelo produto do rendimento do arranjo fotovoltaico pelo rendimento total do PCS;

A é a área útil de captação do arranjo fotovoltaico; e

$R_s(t)$ é a radiação solar incidente no arranjo em função do tempo.

Todavia, a equação 9.1 não é de fácil utilização, pois, para fornecer o valor da potência gerada instantânea, que não tem muita utilidade prática, é necessário que se conheça a radiação solar instantânea, grandeza também bastante difícil de obter.

Então, é conveniente que se obtenha equação mais adequada ao que se deseja. É fácil verificar-se pela equação 9.1 que a potência gerada tem relação direta com a área A do arranjo. Por outro lado, essa área deve ser calculada considerando-se as condições locais do aproveitamento energético. Via de regra, a área necessária ao arranjo, A, é calculada pela seguinte equação (REIS, 2003):

$$A = \frac{P_{\mathrm{I}}}{(\eta \times R_{\mathrm{SM}})} \qquad \textbf{(10.2)}$$

em que:

P_I é a potência instalada e

R_{SM} é a radiação solar máxima no local da instalação.

Existem, segundo Aldabó (2002), diferentes critérios para a determinação da potência instalada, dependendo das condições locais de insolação, do tipo de configuração do sistema fotovoltaico — com ou sem armazenamento energético — e da utilização do sistema. Há métodos com base no número de dias em que o sistema poderá ficar sem sol — critério para o dimensionamento do arranjo e das baterias — e métodos estatísticos, similares aos das usinas hidrelétricas. Neste caso, as baterias fazem papel similar ao dos reservatórios das hidrelétricas, regulando a potência gerada e aumentando, então, o fator de capacidade[42] do sistema (REIS, 2003). Quanto à radiação máxima, usualmente se utiliza R_{SM} = 1 kW/m^2, que é a intensidade de radiação das CPT.

O rendimento das células depende de diversos fatores, conforme já abordado. A operação em módulo possui eficiência global inferior à eficiência das células individuais devido ao fator de empacotamento, à eficiência ótica da cobertura frontal do módulo, à perda nas interconexões elétricas das células e ao descasamento nas características das células (REIS, 2003). Já o rendimento do PCS depende principalmente do inversor. Os valores de rendimentos costumam ser fornecidos pelos fabricantes, devendo ser relembrado que as condições para as quais os rendimentos foram obtidos devem ser consideradas. O Quadro 04, para exemplificar, mostra valores de rendimentos obtidos atualmente para componentes e sistemas fotovoltaicos; portanto, em cada caso real, devem ser utilizados os valores de rendimento fornecidos pelos fabricantes ou verificados em ensaios. A partir de informações como essas, a energia gerada anualmente pelo sistema fotovoltaico pode ser calculada pela equação a seguir (ALDABÓ, 2002; REIS, 2003):

$$E_G = 8.760 \times P_I \times F_C \qquad \textbf{(10.3)}$$

em que:

E_G é a energia gerada por ano, em kWh/ano;

P_I é a potência instalada, em kW;

F_C é o fator de capacidade do sistema;

O número 8.760 é o número de horas considerado para o período de um ano.

[42] Fator de capacidade de um sistema de geração de energia elétrica é o quociente entre a geração efetiva do sistema em determinado período de tempo e a capacidade total máxima de geração do sistema nesse mesmo período. Ele pode ser expresso em por unidade (p.u.) ou em porcentagem.

Quadro 04: Rendimentos obtidos Atualmente em Células, Módulos, PCSs e Centrais

Materiais e/ou tecnologias	Células fotovoltaicas	Módulos fotovoltaicos
m-Si	12% a 15%	10% a 13%
p-Si	12%	11%
Fitas e placas	11%	10%
Filmes finos	7%	ND
a-Si	9%	9%
PCS	95% a plena carga	
Centrais	9% a 10%	

Fonte: REIS, 2003. (modificado).

Segundo Reis (2003), o fator de capacidade do sistema depende: (a) da disponibilidade e da intensidade da insolação; (b) das perdas no sistema; (c) da capacidade instalada dos principais componentes — módulos fotovoltaicos, PCS e baterias. Informações relativas ao fator de capacidade máximo das instalações existentes são, ainda, muito poucas, especialmente para períodos de observação mais longos. Porém, há alguns dados práticos que o situam entre 25% e 30%. Acerca disso, as informações mais importantes referem-se às instalações do Arco Solar, no estado da Califórnia, nos EUA, cujo fator de capacidade máximo tem atingido 30%. O Quadro 05 sintetiza informações relativas a isso.

Quadro 05: Fatores de Capacidade Máximos.

Fonte da informação	Fator de capacidade máximo
DOE	0,27 a 0,30
Arco Solar	0,30
UFPE/CHESF[a]	0,23 a 0,30 (previsão)

Fonte: REIS, 2003. (modificado).
(a) UFPE é a Universidade Federal de Pernambuco, e CHESF é a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.

10.3 CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

10.3.1 Aspectos Gerais[43]

Há diversos nomes utilizados na literatura nacional para designar o mesmo equipamento: célula a combustível, célula combustível — tradução literal do termo inglês *fuel cell* —, célula de combustível e pilha a combustível, com predomínio do primeiro. Neste trabalho,

[43] Aldabó (2004), Portal H2 (2008), Reis (2003), Severino (2008), Tolmasquim (2003) e Wikipédia (2008).

será utilizado o termo **célula a combustível** (CaC) por ser considerado o mais adequado do ponto de vista lingüístico para o caso.

A descoberta do princípio de funcionamento de uma CaC ocorreu há mais de 160 anos. Em 1839, um cientista britânico, William Robert Grove (1811 – 1896), conhecendo o fato de que a passagem de corrente elétrica através de água produzia os gases hidrogênio e oxigênio, conseguiu produzir o processo inverso: combinou hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade e água.

Apesar das várias tentativas feitas por diversos cientistas no decorrer do tempo, os primeiros experimentos bem-sucedidos com CaCs foram realizados nos anos 30 do século XX, quando o engenheiro inglês Francis Thomas Bacon (1904 – 1992) desenvolveu CaCs de eletrólito alcalino. Todavia, apenas em 1959 Bacon conseguiu fazer funcionar uma CaC de 5 kW, capaz de alimentar uma máquina de solda. A partir desse momento, o apoio da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a agência espacial dos EUA, foi decisivo no desenvolvimento dessa tecnologia: a NASA precisava de um gerador elétrico compacto, eficiente e que utilizasse um combustível leve e com grande densidade de energia — o hidrogênio —, para as missões espaciais tripuladas que estavam para acontecer. Com isso, as CaCs fizeram parte dos projetos Gemini e Apollo. Desde então, entidades governamentais e empresas privadas do mundo inteiro dedicam-se ao estudo e à pesquisa para a utilização de CaCs em motores de veículos e em unidades estacionárias de geração elétrica, entre outras aplicações.

De modo simplificado, as CaCs são equipamentos que utilizam a combinação química entre combustível e oxidante para gerar energia elétrica. Então, é correto concluir que as CaCs têm o mesmo princípio basilar de funcionamento das baterias: são dispositivos que produzem energia elétrica a partir de reações eletroquímicas, sem a necessidade de combustão ou de dispositivos rotativos. Além disso, as CaCs assemelham-se às baterias quanto à possibilidade de empilhamento de elementos em conjuntos maiores. No caso das CaCs, com tensão por elemento da ordem de 1 V, a tensão na saída de um conjunto de elementos pode, em princípio, ser elevada a qualquer valor.

Entretanto, há diferenças: na bateria, a energia é acumulada nos componentes existentes no interior dela, pois ela contém o combustível e o oxidante dentro do próprio invólucro; na CaC, a energia elétrica é produzida enquanto for mantido o fluxo dos reagentes, não existindo

acumulação de energia no interior dela. Desse modo, ao contrário do que ocorre com as baterias, as CaC não são exauríveis e não necessitam de recarga.

O processo que se desenvolve em uma CaC é exatamente o inverso do que ocorre na eletrólise da água — a hidrólise; por isso, a CaC e o hidrolisador, aqui chamado simplesmente de eletrolisador, são dispositivos duais entre si, conforme mostrado na figura 11.

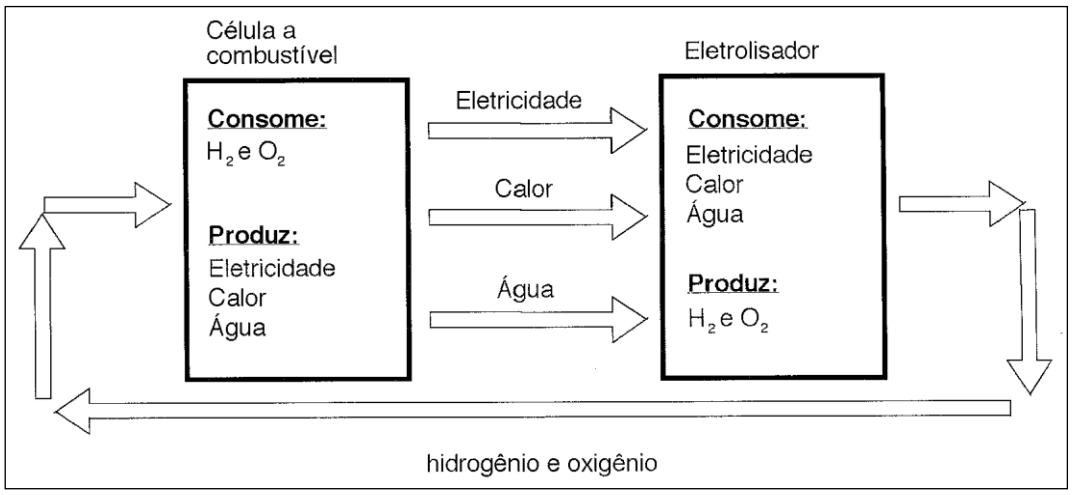


Figura 11: Dualidade entre CaC e Eletrolisador.
Fonte: REIS, 2003.

Ao contrário do que ocorre nas máquinas e motores convencionais, as CaCs convertem a energia química do combustível diretamente em energia elétrica sem que haja combustão. Conseqüentemente, as CaCs são capazes de produzir energia elétrica com maior eficiência, pois apresenta um estágio de conversão a menos; mais silenciosamente, pois não utiliza explosão nem rotação; e sem poluição, pois possui como produtos da operação apenas eletricidade, água e calor. A figura 12 esquematiza a diferença entre esses dois processos de geração elétrica.

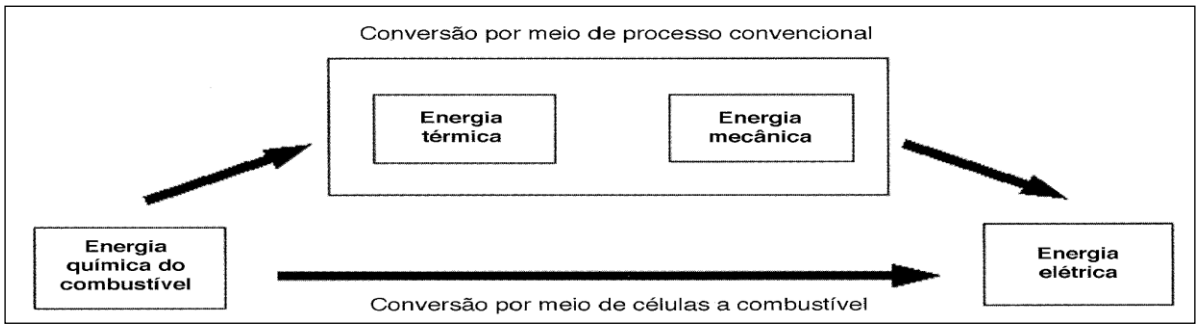


Figura 12: Comparação entre a Conversão Direta de Energia com CaCs e a Tecnologia Convencional de Conversão Indireta.
Fonte: REIS, 2003.

Existem, pelo menos, seis tecnologias principais diferentes que permitem às CaCs combinarem combustível e oxidante. Mas todas elas têm base no mesmo princípio de funcionamento: de um lado da célula, entra o combustível, do outro, entra o oxidante; no meio, entre os eletrodos, existem o eletrólito e o catalisador, que são os responsáveis pelas reações eletroquímicas. De acordo com a tecnologia utilizada, as CaCs podem variar de tamanho, temperatura de operação, combustível, eletrólito e aplicações, sendo que o nome de cada tecnologia está geralmente vinculado ao tipo de eletrólito ou de combustível utilizado. O tipo de eletrólito normalmente determina a temperatura de operação da CaC, e cada tipo de tecnologia requer materiais e combustível particulares, possui vantagens e desvantagens, além de ter aplicação direcionada.

10.3.2 Componentes Básicos e Princípio de Funcionamento[44]

Conforme já informado, as CaCs são dispositivos eletroquímicos que convertem diretamente a energia química do combustível em eletricidade por meio de reações de oxidação e redução, ou seja, sem que haja combustão. Basicamente, cada unidade individual de CaC, aqui denominada célula unitária, é formada por dois eletrodos porosos, anodo e catodo, e um eletrólito entre eles. O combustível é fornecido continuamente ao lado do anodo, e o oxidante, ao lado do catodo.

Como resultado da oxidação do combustível no anodo e da redução do oxidante no catodo, é gerada corrente elétrica. O combustível e o oxidante mais utilizados são, respectivamente, o hidrogênio (H_2) e o oxigênio (O_2) do ar.

Com o auxílio de catalisador, o H_2 é oxidado no anodo, reação em que ele cede elétrons para o eletrodo e produz íons H^+, que passam através do eletrólito rumo ao catodo. Novamente com o auxílio de catalisador, o O_2 é reduzido no catodo, reação em que ele recebe elétrons do eletrodo e da qual participam os íons H^+ oriundos do anodo, gerando água e calor. O eletrólito é composto de material que permite o fluxo de íons entre os eletrodos, mas impede a passagem de elétrons.

A figura 13 apresenta o esquema de operação das CaCs alimentadas com H_2 e O_2.

[44] Aldabó (2004), Electrocell (2008), Portal H2 (2008), Reis (2003), Reis e Silveira (2001), Severino (2008) e Tolmasquim (2003).

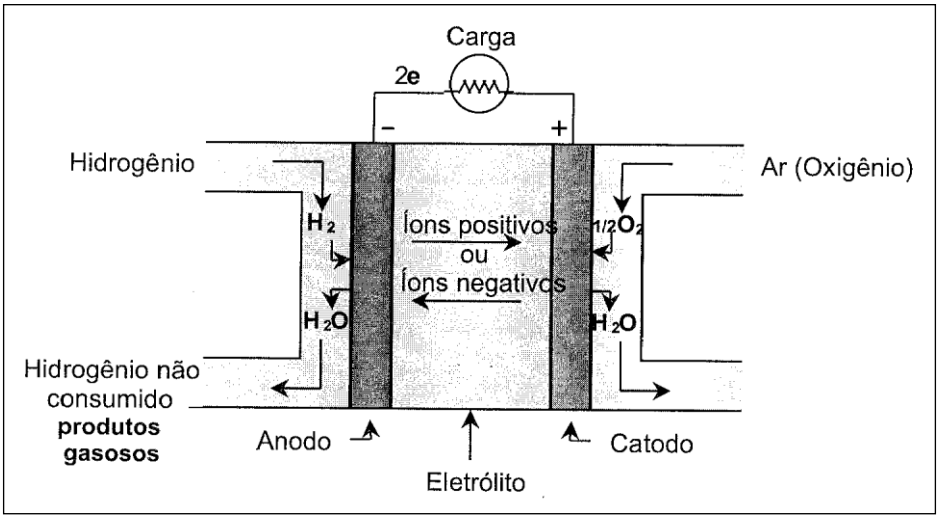


Figura 13: Esquema Básico de Operação de CaCs Alimentadas com H_2 e O_2.

O excesso de elétrons no anodo e a falta deles no catodo produzem uma tensão elétrica nesses terminais, que pode ser utilizada para estabelecer corrente elétrica por um circuito externo à célula unitária, suprindo energia elétrica a uma carga externa. Por esse processo, que é isotérmico — não sofre, portanto, as limitações de eficiência de uma máquina de Carnot, máquina térmica que opera entre dois reservatórios de temperaturas determinadas e diferentes —, possui eficiência da ordem de 55% para a mistura hidrogênio-ar.

Verifica-se, então, que todo o processo de geração elétrica descrito envolve duas reações: uma de oxidação e outra de redução. Logo, o processo completo é composto pelo que a literatura especializada da área denomina reação global, e as reações que o compõem são meias-reações: a meia-reação de oxidação e a meia-reação de redução. Geralmente, a reação global de uma célula unitária é a formação de água a partir de hidrogênio e oxigênio. Dessa forma, por exemplo, em uma célula do tipo ácida — aquela com eletrólito ácido — cujo combustível é o hidrogênio, a reação global é a representada a seguir:

$$H_2 + ½O_2 \rightarrow H_2O \qquad \textbf{(10.4)}$$

Essa reação global é o resultado da combinação da meia-reação de oxidação que ocorre no anodo, representada na equação 9.5, e da meia-reação de redução que ocorre no catodo, representada na equação 9.6. Nessas equações, estão destacados em negrito os portadores de carga.

$$H_2 \rightarrow 2\mathbf{H^+} + 2e^- \qquad \textbf{(10.5)}$$

$$½O_2 + 2\mathbf{H^+} + 2e^- \rightarrow H_2O \qquad \textbf{(10.6)}$$

Nos tipos de CaC em que há fluxo de íons positivos através do eletrólito, forma-se água no catodo; já nos tipos de CaC em que há fluxo de íons negativos através do eletrólito, a água é formada no anodo.

A corrente elétrica gerada é proporcional à área útil dos eletrodos, que são a interface entre os gases reagentes, o catalisador e o eletrólito e de importância fundamental para o bom desempenho da célula unitária. Os eletrodos, além de condutores elétricos, devem: **(a)** ser porosos para permitir a permeação dos gases até o eletrólito; **(b)** ter propriedades catalíticas para acelerar as reações eletroquímicas; **(c)** ser impermeáveis ao eletrólito, quando este for líquido, para que o eletrólito não afogue o eletrodo e impeça o acesso dos gases à zona de reação; e **(d)** ser construídos com material adequado. O papel de fibra de carbono é usualmente utilizado para essa função, pois é poroso, hidrofóbico, condutivo e não-corrosivo. Geralmente, o material do eletrodo é muito fino, para maximizar o transporte de gás e água.

O catalisador é responsável pela quebra da molécula de H_2 em H^+ e em e^-. Ele é adicionado à superfície de cada eletrodo fazendo o contato com o eletrólito de forma a aumentar a taxa de reações químicas, mas não é consumido nesse processo. Geralmente, a platina é utilizada como catalisador por causa de sua alta atividade eletrocatalisadora, de sua alta estabilidade e de sua elevada condutividade elétrica. Porém, a platina é um metal muito caro, com o fato agravante de forte tendência de encarecimento, e tem participação significativa no custo final da célula. Em razão disso, os fabricantes procuram minimizar a quantidade de platina utilizada sem perder a eficiência no processo. Normalmente, a platina é utilizada em CaCs de temperaturas de operação baixas, entre 40 °C e 200 °C, nas tecnologias PEMFC e PAFC, que serão detalhadas adiante. Nas CaCs de temperaturas mais altas, entre 600 °C e 1.000 °C, não há a necessidade de se utilizar um excelente catalisador, pois as altas temperaturas já ativam grande número de reações. Nesses casos, ligas de materiais com níquel podem ser utilizadas como catalisadores eficientes e de baixo custo.

Uma vez que a tensão gerada por célula unitária é geralmente menor que 1 V, quando há a necessidade de potência e/ou tensão mais elevadas, as células unitárias são montadas em arranjos em série, conforme exemplificado na figura 14.

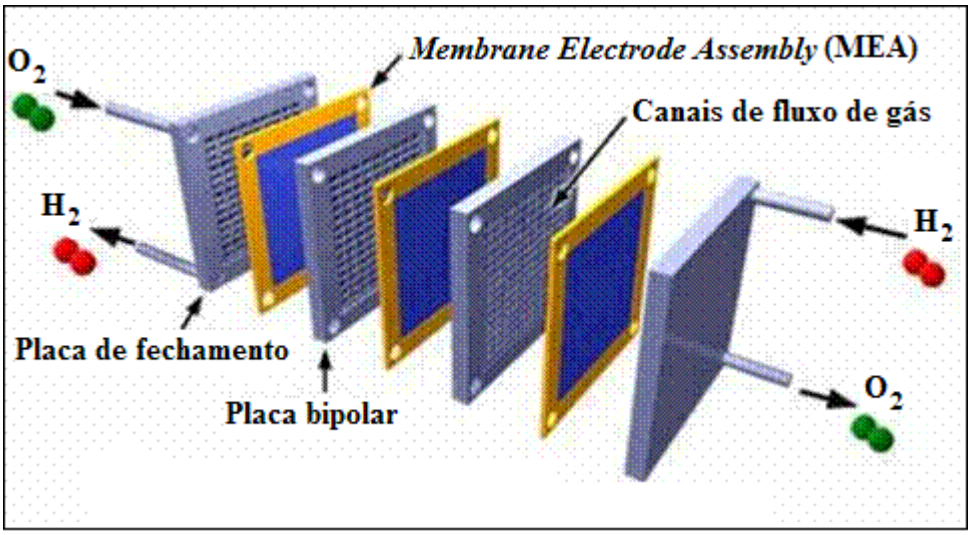


Figura 14: Esquema de Arranjo em Série de Três Células Unitárias.
Fonte: ELECTROCELL, 2008. (modificada).

Entre os pares de células unitárias, são colocadas placas bipolares, também chamadas de placas separadoras. Estas possuem canais para a distribuição de gases, em desenho de serpentina, nas duas faces. O desenho dos canais de fluxo de gases é fundamental para a geração uniforme de potência, a estabilidade da célula e o correto gerenciamento do produto água. Diferentes tipos de desenhos para esses canais estão associados aos vários tipos de aplicações. As placas abastecem de combustível o anodo e de oxidante o catodo de duas células unitárias adjacentes, retiram os gases reagidos e a água formada, coletam e transmitem a corrente elétrica de uma célula unitária para outra contígua para que a energia de todas as células unitárias flua para a carga externa, por meio de conexão elétrica adequada. As placas são geralmente feitas de grafite ou de metais. O grafite é o material preferido devido às suas características de excelente condutividade elétrica, baixa taxa de contaminação sofrida e relativo baixo custo. Todavia, ele é quebradiço e poroso.

Na figura 14, a MEA é o conjunto membrana-eletrodo, constituída, na realidade, por um eletrólito entre dois eletrodos de carbono poroso com catalisador integrado entre cada um dos eletrodos e a respectiva face do eletrólito. Desse modo, cada MEA é uma célula unitária mencionada anteriormente; com três dessas células unitárias, formou-se o arranjo mostrado.

Quando se deseja aumentar a potência disponível, esses arranjos de células unitárias podem ser conectados em paralelo, formando o que se denominam módulos, que, por sua vez, ainda podem ser agrupados em paralelo para formarem uma CaC completa, com potência e tensão nominais desejadas.

Além dos componentes já mencionados, utilizam-se sensores e componentes eletrônicos para o monitoramento e o controle da CaC. Muitas vezes, também há a necessidade de se utilizarem umidificadores para os gases reagentes, para que ocorra uma melhor condução dos íons dentro da célula, e reformadores, para extrair o hidrogênio do combustível.

10.3.3 Aspectos Positivos e Negativos[45]

De modo geral, as CaCs apresentam vantagens em relação aos motores de combustão interna e outras máquinas térmicas utilizados para a geração elétrica. Essas vantagens estão associadas aos aspectos positivos dessa tecnologia, que incluem os listados a seguir, além dos já mencionados benefícios da utilização genérica da GD.

(1) Alta eficiência energética: As CaCs convertem a energia química do combustível diretamente em energia elétrica, sem a transformação intermediária em energia térmica que ocorre em outros casos. A conseqüência disso é que as CaCs apresentam eficiência que pode ser maior que o dobro da apresentada pelos motores de combustão, conforme mostra a figura 15, e isso significa um quociente entre energia gerada e combustível utilizado mais favorável às CaCs. Nessa figura, a expressão "Pilhas a combustível" é utilizada para designar CaCs, e poder calorífico inferior é a quantidade de calor que pode ser produzida por 1 kg de combustível, quando este entra em combustão com excesso de ar, e os gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando, assim, que a água contida na combustão seja condensada.

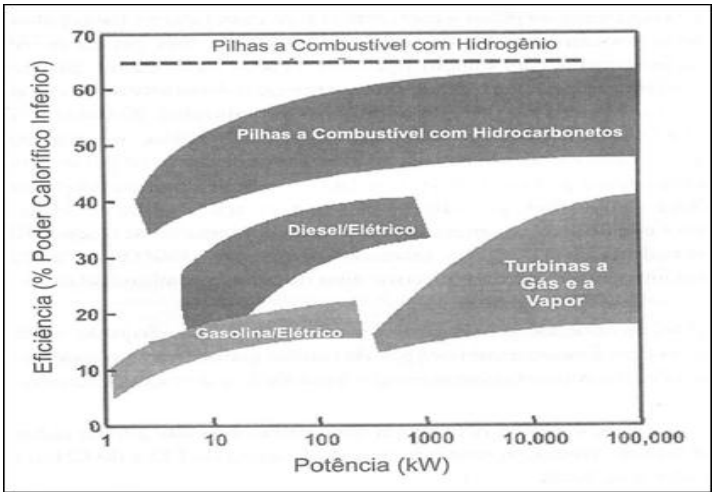


Figura 15: Comparação da Eficiência Energética de Diversos Sistemas de Geração.
Fonte: TOLMASQUIM, 2003.

[45] Aldabó (2004), Electrocell (2008), Portal H2 (2008), Reis (2003), Reis e Silveira (2001), Severino (2008) e Tolmasquim (2003).

(2) Alta eficiência em carga parcial: As CaCs possuem eficiência alta mesmo quando operam com carga baixa, ao contrário do que ocorre com os motores de combustão, que apresentam as maiores eficiências quando operam com potência próxima à nominal.

(3) Baixo impacto ambiental: Devido à maior eficiência na transformação de energia, as CaCs, quando alimentadas com hidrocarbonetos, geram menos CO_2 por unidade de energia gerada que os motores de combustão; além disso, geram menos poluentes locais e regionais, como CO, hidrocarbonetos volatilizados, SO_x, NO_x e particulados. Com isso, elas contribuem para a redução dos gases causadores do efeito estufa e para a diminuição da poluição da atmosférica. Adicionalmente, a utilização de CaCs em substituição a baterias e pilhas usadas em equipamentos eletrônicos reduz o impacto poluidor que o descarte destes componentes causa nos aterros sanitários e lençóis freáticos. Finalmente, algumas CaCs, como as que utilizam o H_2 como combustível, simplesmente não têm operação poluente e, se são utilizadas em substituição a outra forma poluente de geração, reduzem em 100% a emissão de gases nocivos ao ambiente.

(4) Reduzida poluição sonora: As CaCs não possuem peças móveis, embora seus periféricos possam utilizar compressores, e não realizam explosões; por isso, são mais silenciosas que os motores de combustão. Essa característica aumenta bastante a possibilidade de geração de energia elétrica em residências, tal como já ocorre com a utilização dos painéis fotovoltaicos, e, com a ampliação do uso das CaCs em veículos automotores, deve contribuir muito para a redução da poluição sonora no trânsito.

(5) Alta confiabilidade: Uma vez que não possuem peças móveis, as CaCs sofrem menor desgaste das partes, e a necessidade de manutenção é diminuída, reduzindo custos e aumentando a disponibilidade do equipamento, especialmente nas células de baixas temperaturas. A característica modular também contribui para aumentar a confiabilidade e a disponibilidade das CaCs. Todavia, a utilização de combustível com características inadequadas pode ser extremamente prejudicial a elas.

(6) Bom desempenho operativo: Essa característica decorre da alta eficiência, da alta confiabilidade e do atendimento adequado ao propósito de suprir energia elétrica a uma carga.

(7) Montagem em módulos: As CaCs são constituídas por arranjos em paralelo de módulos, o que confere às CaCs grande flexibilidade para serem produzidas com diferentes potências. Adicionalmente, a estrutura modular: facilita e torna menos onerosa a manutenção; aumenta a disponibilidade do equipamento, melhorando o desempenho no quesito confiabilidade; permite adequar melhor a expansão da geração ao aumento de carga,

considerando-se tanto quantidade quanto velocidade; e aumenta a suscetibilidade de produção em massa.

(8) Possibilidade de dispersão das centrais: Isso decorre da possibilidade da instalação das CaCs em áreas urbanas ou rurais, caracterizando aumento da distribuição da geração e, conseqüentemente, agregando o valor dos benefícios da utilização da GD.

(9) Possibilidade de co-geração: Especialmente nas CaCs de alta temperatura, o calor gerado pode ser utilizado para diversas finalidades, como, por exemplo, aquecer ambientes, aquecer água, gerar vapor, gerar eletricidade e aquecer outros equipamentos, tais como reformadores. A eficiência energética de uma CaC de alta temperatura em conjunto com uma turbina a gás pode chegar a mais de 70%; quando o calor também é utilizado, a eficiência energética aproxima-se de 85%.

(10) Flexibilidade de combustível: As CaCs podem operar com diversos combustíveis além do hidrogênio, renováveis ou não, tais como derivados de combustíveis fósseis — gás natural, destilados de petróleo, gás liquefeito de petróleo (GLP), gás de síntese da gaseificação do carvão —, álcoois — principalmente metanol e etanol —, gases resultantes da gaseificação da biomassa e de nitrogenados — amônia e hidrazina. Quando utilizados, esses combustíveis são inicialmente submetidos a uma reação com o vapor, em um processo conhecido como reforma catalítica. Em seguida, o gás resultante desse processo reage com o oxigênio no interior da célula produzindo principalmente água, calor e energia elétrica, sem a ocorrência da combustão. Comparado com a combustão tradicional, este processo realiza-se com eficiência significativamente mais alta e com baixíssima emissão de gases poluentes. Nas CaCs de alta temperatura, é possível realizar internamente a reforma dos hidrocarbonetos e álcoois, mas já existem equipamentos, desenvolvidos ou em fase final de desenvolvimento, que permitem gerar hidrogênio a partir desses combustíveis para a alimentação das CaCs que operam em temperaturas mais baixas.

(11) Flexibilidade de aplicação: As CaCs podem ser aplicadas nas mais diversas áreas hoje atendidas por baterias, pilhas e sistemas de geração convencionais. As aplicações embarcadas incluem motos, carros, caminhões, ônibus, trens, aviões, veículos militares e navios — Canadá, Alemanha, Espanha, China, Austrália e EUA já utilizam ônibus que possuem CaC. As aplicações estacionárias incluem sistemas de segurança do tipo *no-break*, geração isolada ou conectada à rede elétrica, desde poucos quilowatts até dezenas de megawatts — as CaCs já fornecem energia limpa e eficiente a fazendas, hospitais, *shopping centers* e indústrias em todo o mundo, inclusive no Brasil, como é caso das cidades de São Paulo, do Rio de Janeiro e de Curitiba. Há também a possibilidade de uso em equipamentos

portáteis, tais como telefones celulares, *palmtops*, *latpots* e outros equipamentos alimentados por baterias ou pilhas. Outra possibilidade é o uso múltiplo, como, por exemplo, fazer uso da energia elétrica gerada com CaC em um automóvel para alimentar uma residência.

No atual estágio do desenvolvimento das CaCs, os principais aspectos negativos incluem os apresentados a seguir. Porém, muitos autores acreditam que essas desvantagens possam ser muito atenuadas em pouco tempo, tornando as CaCs ainda mais atrativas para a solução de determinados problemas de suprimento de energia elétrica.

(1) Custo inicial elevado, em comparação com outras formas de geração elétrica, decorrente do emprego de materiais nobres.

(2) Tecnologia ainda não-popularizada.

(3) Falta de infra-estrutura e de suporte.

(4) Suscetibilidade à contaminação pela ação de alguns componentes existentes no combustível.

(5) Desempenho dependente de vários fatores: O desempenho de uma CaC depende, obrigatoriamente, de variáveis como a temperatura, a pressão, a constituição dos gases e as interações dela com o sistema onde está instalada, aumentando a vulnerabilidade a problemas de desempenho.

(6) Confiabilidade e suportabilidade a condições adversas ainda não demonstradas.

(7) Necessidade de processamento e de reforma do combustível: De fato, em alguns casos, há essa necessidade, que eleva o custo do sistema e aumenta as complicações operativas.

10.4 TECNOLOGIAS[46]

Os diferentes tipos de CaCs ou tecnologias associadas encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento. Alguns tipos de tecnologias foram ou estão sendo abandonados por problemas de durabilidade ou sensibilidade a contaminadores. Por outro lado, algumas outras tecnologias estão em desenvolvimento acelerado e começam a ocupar lugar no mercado.

Os principais tipos existentes estão listados a seguir, juntamente com a terminologia pela qual são mais conhecidos em língua inglesa.

(1) CaC com eletrólito alcalino ou CaC alcalina – *alkaline fuel cell* (AFC);

[46] Aldabó (2004), Electrocell (2008), Portal H2 (2008), Reis (2003), Reis e Silveira (2001), Severino (2008) e Tolmasquim (2003).

(2) CaC com eletrólito de membrana polimérica ou CaC de membrana polimérica – *proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC);

(3) CaC com eletrólito ácido ou CaC ácida – *phosforic acid fuel cell* (PAFC);

(4) CaC com eletrólito de carbonato fundido ou CaC de carbonato fundido – *molten carbonate fuel cell* (MCFC);

(5) CaC com eletrólito de óxido sólido ou CaC de óxido sólido – *solid oxide fuel cell* (SOFC);

(6) CaC de óxido sólido de temperatura intermediária – *intermediate temperature solid oxide fuel cell* (ITSOFC);

(7) CaC alimentada diretamente com metanol – *direct methanol fuel cell* (DMFC);

(8) CaC alimentada diretamente com etanol – *direct ethanol fuel cell* (DEFC).

O hidrogênio é o combustível mais adequado, e todas as CaCs podem funcionar com esse gás. Todavia, conforme já mencionado, outros combustíveis também podem ser utilizados.

O Quadro 06 apresenta as reações totais nas CaCs para diversos combustíveis.

Quadro 06: Reações nas CaCs em Função do Tipo de Combustível.

Combustível	**Reação total**
Hidrogênio (H_2)	$H_2 + ½O_2 \rightarrow H_2O$
Metanol (CH_3OH)	$CH_3OH + 3/2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$
Etanol (C_2H_5OH)	$C_2H_5OH + 3O_2 \rightarrow 3H_2O + 2CO_2$
Monóxido de carbono (CO)	$CO + ½O_2 \rightarrow CO_2$
Metano (CH_4)	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$

Fonte: TOLMASQUIM, 2003. (modificado).

O Quadro 07 apresenta as reações que ocorrem no anodo e no catodo de cada tipo de CaC apresentado, além de algumas outras informações importantes acerca desses tipos de CaCs.

Após o Quadro 07, apresenta-se, a seguir, em complementação às informações do Quadro 07, uma descrição sumária de cada um dos tipos apresentados de CaCs (sub-itens 9.4.1 a 9.4.8).

Quadro 07: Características das CaCs.

Tipo de CaC	Eletrólito	Temperaturas de operação (°C)	Reação(ões) no anodo	Reação(ões) no catodo	Aplicação(ões)
AFC	Solução de KOH	50 a 120[a]	$H_2 + 2\mathbf{OH}^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$½O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2\mathbf{OH}^-$	Espaciais e militares, transporte
PEMFC	Membrana polimérica	20 a 125	$H_2 \rightarrow 2\mathbf{H}^+ + 2e^-$	$½O_2 + 2\mathbf{H}^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	Transporte e geração de baixa potência
PAFC	Ácido ortofosfórico (H_3PO_4)	160 a 220	$H_2 \rightarrow 2\mathbf{H}^+ + 2e^-$	$½O_2 + 2\mathbf{H}^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	Transporte pesado, geração de média potência, co-geração
MCFC	Carbonatos fundidos de Li + K	550 a 660	$H_2 + \mathbf{CO_3}^{-2} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + \mathbf{CO_3}^{-2} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$½O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow \mathbf{CO_3}^{-2}$	Geração de potência intermediária e de base, co-geração
SOFC	Zircônia (ZrO_2) estabilizada com ítria	850 a 1.000	$H_2 + \mathbf{O}^{-2} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + \mathbf{O}^{-2} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + \mathbf{4O}^{-2} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$½O_2 + 2e^- \rightarrow \mathbf{O}^{-2}$ $2O_2 + 8e^- \rightarrow 4\mathbf{O}^{-2}$	Geração de potência intermediária e de base, co-geração
ITSOFC	Óxidos de cério	400 a 600	$H_2 + \mathbf{O}^{-2} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + \mathbf{O}^{-2} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + \mathbf{4O}^{-2} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$½O_2 + 2e^- \rightarrow \mathbf{O}^{-2}$ $2O_2 + 8e^- \rightarrow 4\mathbf{O}^{-2}$	Transporte
DMFC	Membrana polimérica	80 a 140	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6\mathbf{H}^+ + 6e^-$	$3/2O_2 + 6\mathbf{H}^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$	Transportes e portáteis
DEFC	Membrana polimérica	100 a 130	$C_2H_5OH + 3H_2O \rightarrow 2CO_2 + 12\mathbf{H}^+ + 12e^-$	$3O_2 + 12\mathbf{H}^+ + 12e^- \rightarrow 6H_2O$	Transportes e portáteis

Fonte: TOLMASQUIM, 2003. (modificado).
(a) Há CaCs Alcalinas que Operam a 250°C; nelas, o Eletrólito de KOH é mais concentrado que naquelas que operam em temperaturas mais baixas.

10.4.1 CaC Alcalina (AFC)

As AFCs utilizam como eletrólito solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH) e operam com eficiência de 50% a 60%. A reação de oxidação em eletrólitos alcalinos é mais rápida que em eletrólitos ácidos, o que torna viável a utilização de metais não-nobres, e mais baratos como catalisadores. A maior desvantagem desse tipo de célula reside no fato de os eletrólitos alcalinos reagirem com o CO_2, restringindo o emprego desse tipo de célula a aplicações em que o oxigênio e o hidrogênio puros são utilizados como reagentes.

As AFCs não requerem materiais de alto custo na sua construção. Pela grande compatibilidade com muitos materiais, têm vida longa, tendo-se já registrado períodos de operação superiores a 15.000 h. Não obstante o seu alto custo, elas têm-se mostrado viáveis para aplicações estratégicas, como missões espaciais, submarinas e militares. O aumento do interesse nesse tipo de CaC para aplicações terrestres móveis e estacionárias está vinculado ao desenvolvimento de componentes de baixo custo para sua viabilização econômica.

10.4.2 CaC de Membrana Polimérica (PEMFC)

Nas PEMFCs, o eletrólito consiste em uma membrana polimérica fluorada e condutora de prótons. A temperatura de operação dessas CaCs é de cerca de 80 °C, o que permite a partida rápida — desejável para aplicação automotiva —, por causa do menor tempo necessário ao aquecimento do eletrólito. Devido ao mecanismo de condução iônica operante na membrana polimérica que compõe o eletrólito, o desempenho desta CaC depende do estado de umidificação da membrana: a desidratação da membrana diminui a sua condutividade elétrica; por outro lado, o excesso de água pode causar o afogamento dela, impedindo o fluxo de gases, principalmente o do oxigênio no anodo. A necessidade de umidificação da membrana impede a operação acima da temperatura de 100 °C, a não ser que a PEMFC seja pressurizada a mais de 1 atm, condição em que a temperatura de ebulição da água é mais elevada.

Nas PEMFCs, os eletrodos e o eletrólito são produzidos em um único conjunto conhecido como *membrane electrode assembly* (MEA), já apresentada na figura 14, em que cada componente é o mais fino possível para proporcionar o caminho mais curto para os gases e para reduzir a resistência ôhmica da membrana. A espessura final deve considerar a resistência mecânica do conjunto e a impermeabilidade da membrana aos gases.

Por serem mais eficientes e não provocarem o desprendimento de gases poluentes, essas células são aplicadas na indústria automobilística em substituição aos motores de combustão interna e tem-se mostrado solução bastante promissora para aplicações estacionárias, como em centrais de co-geração. Porém, para a disseminação do uso das PEMFCs, será necessário reduzir o custo de produção delas: os componentes mais caros são o eletrólito de membrana polimérica, as placas separadoras — feitas de grafite de alta densidade e com alto custo de usinagem — e os eletrodos — devido aos catalisadores à base de platina. Além disso, esse tipo de célula está sujeita à contaminação pelo monóxido de carbono e requer resfriamento e controle do vapor de exaustão para operar adequadamente.

Segundo especialistas de todo o mundo, de todas as tecnologias existentes hoje para as CaCs, a PEMFC deve ser a vencedora, para aplicações comerciais gerais, pelas seguintes razões: **(a)** a possível redução dos custos de produção; **(b)** a modularidade; **(c)** a temperatura de operação, adequada a muitas aplicações de pequeno porte; **(d)** o desenvolvimento e o barateamento da tecnologia para aplicações estacionárias em função da aplicação pela indústria automobilística; **(e)** a rápida resposta; **(f)** juntamente com a SOFC, possui a maior relação energia gerada por volume de combustível consumido.

10.4.3 CaC Ácida (PAFC)

As PAFCs, únicas comercializadas desde 1994, são as de tecnologia mais antiga e mais desenvolvida até o presente. Utilizando o ácido fosfórico como eletrólito, elas podem ser abastecidas com combustíveis relativamente limpos, derivados do processo de reforma de combustíveis fósseis como o gás natural, o GLP e outros destilados leves, ou, ainda, do processo de limpeza do gás de carvão produzido por um gaseificador. Podem também utilizar o metanol e o etanol como combustíveis, após estes serem submetidos ao processo de reforma para a produção de gás rico em H_2. Todavia, devem ser tomadas precauções para evitar o envenenamento e a deterioração do anodo pelo CO ou pelo gás sulfídrico (H_2S) que podem ser liberados no processo de reforma.

Para proporcionar maior atividade das reações eletroquímicas, as PAFCs requerem o emprego de catalisadores à base de metais nobres, como a platina, o que representa grande desvantagem pelo alto custo envolvido. Não obstante essa desvantagem, o ácido fosfórico

oferece algumas vantagens, como a excelente estabilidade térmica, química e eletroquímica e a baixa volatilidade para temperaturas superiores a 150 °C. A vantagem desse tipo de célula é a construção relativamente simples, com base em materiais produzidos a partir de processos amplamente dominados pela indústria.

A principal aplicação das PAFCs dá-se nas centrais de co-geração de 50 kW a 1.000 kW, para instalação nas dependências do consumidor e destina-se ao suprimento de eletricidade e calor para estabelecimentos comerciais, conjuntos residenciais e pequenas indústrias. O calor obtido pela recuperação parcial ou total do calor residual gerado no processo pode ser utilizado para aquecimento de água ou para ar-condicionado mediante processo de absorção. Esses são os maiores segmentos relevantes do mercado identificados até o presente como economicamente viáveis para a utilização desse tipo de CaC, que tem nível de produção ainda em fase de amadurecimento.

10.4.4 CaC de Carbonato Fundido (MCFC)

As MCFCs utilizam como eletrólito uma mistura de carbonatos alcalinos fundidos. Operam em temperaturas de 550 °C a 650 °C, com eficiência entre 55% e 60%. Uma das características das MCFCs que as diferenciam das demais é o envolvimento do CO_2 nas reações eletroquímicas. O catodo deve ser suprido de CO_2 que, reagindo com o O_2 e os elétrons liberados pelo anodo, produzem os íons de carbonato (CO_3^{-2}), que irão conduzir a corrente iônica através do eletrólito. No anodo, esses íons são consumidos no processo de oxidação do H_2, formando vapor d'água e CO_2, que é reconduzido ao catodo. O combustível utilizado é, normalmente, um gás rico em H_2, produzido a partir do gás natural reformado. O calor e o vapor d'água produzidos na reação química da célula podem ser utilizados no processo de reforma do metano do gás natural, caracterizando, assim, o processo conhecido como reforma interna do combustível.

A tecnologia das MCFCs está se tornando cada vez mais atrativa para aplicações em centrais de co-geração de médio e grande portes, por oferecer diversas vantagens não só sobre as unidades convencionais de geração, mas também sobre os sistemas com PAFCs. Entre essas vantagens, destaca-se a elevada eficiência combustível/energia elétrica, que pode exceder 55%, bem superior, portanto, aos 33% – 35% das unidades de tecnologia convencional e aos 40% – 45% observados nas unidades de PAFCs, sem o aproveitamento do calor residual.

Quando o calor residual é utilizado em esquema de ciclo combinado, a eficiência global da central pode atingir 85%. A elevada temperatura de operação das MCFCs torna-as adequadas para aplicações em sistemas de co-geração que operam em ciclo combinado. O desenvolvimento dessa tecnologia tem encontrado grandes problemas relacionados à degradação e à estabilidade dos componentes e materiais empregados nas células.

10.4.5 CaC de Óxido Sólido (SOFC)

As SOFCs utilizam eletrodos cerâmicos à base de zircônio e operam a cerca de 1.000 °C, gozando, portanto, das mesmas vantagens das MCFCs em relação às células de baixas temperaturas: (a) dispensam a utilização de catalisadores à base de materiais nobres e de alto custo; (b) permitem o processamento direto do combustível no interior da própria célula — reforma interna; e (c) são adequadas para a produção de calor residual em sistemas de co-geração com ciclo combinado.

O projeto das SOFCs está sendo desenvolvido segundo três concepções distintas: a tubular, a planar e a monolítica. Na concepção tubular, as células operam com o combustível fluindo nas superfícies externas de um feixe de tubos. O oxidante flui internamente ao tubo que é composto por eletrodos e eletrólito em tubos concêntricos, formando um *sanduíche*. Nesse caso, a célula é denominada *tubular* SOFC, ou TSOFC. Na concepção planar, as células são constituídas por placas montadas juntas e empilhadas, com vantagens sobre o sistema tubular: a relativa facilidade de fabricação e a baixa resistência elétrica do eletrólito, com redução de perdas. Na concepção monolítica, que está em estágio inicial de desenvolvimento, a construção tem base em um processo de sintetização/corrugação dos eletrodos e do eletrólito para formar uma estrutura em forma de colméia.

As seguintes características, próprias da SOFCs, tornam-nas vantajosas em relação às MCFCs: **(a)** possuem eletrólito sólido, tendo, portanto, maior estabilidade; **(b)** o eletrólito não é corrosivo, possibilitando vida útil mais longa; **(c)** não necessitam de reciclagem de CO_2, dispensando os componentes auxiliares para essa finalidade; e **(d)** são mais tolerantes à contaminação pelo enxofre e suporta processos de remoção de contaminantes a temperatura elevada. Em contrapartida, a elevada temperatura das SOFCs traz algumas desvantagens, como a redução da energia livre disponível na célula e outros problemas relacionados com os

materiais utilizados na célula e em equipamentos auxiliares, tais como trocadores de calor e preaquecedores.

O calor produzido nessas células pode ser utilizado em aplicações de co-geração ou para acionar turbina a vapor, produzindo, assim, energia elétrica adicional àquela gerada com as reações químicas da célula. Além disso, podem ser utilizados diferentes tipos de combustível, desde o H_2 até o metano ou o monóxido de carbono, sendo que a natureza das emissões varia conforme a mistura do combustível.

Há a expectativa de que seja possível, dentro de pouco tempo, a construção modular de centrais de grande porte com densidade energética de cerca de 1 MW/m^3 e eficiência de 50% a 60%. Devido à alta temperatura de operação, as SOFCs são adequadas para operarem em esquema de ciclo combinado, em que o combustível não-submetido à reação química que sai da célula é queimado em uma turbina a gás. Uma vez que a temperatura dos gases de exaustão é da ordem de 500 °C a 900 °C, o calor residual pode ser utilizado para gerar vapor, podendo-se, com isso, atingir eficiência global de cerca de 80%.

10.4.6 CaC de Óxido Sólido de Temperatura Intermediária (ITSOFC)

Um considerável esforço de pesquisa é realizado com o objetivo de abaixar a temperatura de operação das SOFCs, o que permitiria o uso de materiais mais baratos, estenderia o campo de aplicação das SOFCs, por exemplo, à tração em veículos, e aumentaria a confiabilidade e a vida útil da célula. Temperaturas de operação abaixo de 800 °C só serão possíveis com a aplicação de novos materiais nos componentes da CaC. Para o desenvolvimento desse tipo de CaC, pesquisam-se novos eletrólitos com boa condutividade em temperaturas abaixo de 800 °C, principalmente as cerâmicas à base de cério (Ce) dopadas com gadolínio (Gd). Há, ainda, um longo caminho a ser percorrido no desenvolvimento desse tipo de CaC.

10.4.7 CaC de Metanol Direto (DMFC)

Esse tipo de CaC não precisa de reformador para a produção de hidrogênio, pois o metanol é diretamente oxidado no anodo. A principal aplicação prevista para a DMFC é a substituição das baterias de equipamentos eletrônicos, como telefones celulares e microcomputadores, que poderão funcionar por longos períodos, desde que haja alimentação com metanol. Em princípio, existem duas maneiras diferentes de se alimentar essa CaC: com o metanol na

forma líquida ou na forma vaporizada. No segundo caso, a temperatura de operação é maior que no primeiro. A temperatura de operação mais alta aumenta a resistência do catalisador à contaminação por CO e acelera a cinética de oxidação do metanol, melhorando o desempenho da célula. Todavia, aumenta a complexidade do sistema devido à necessidade de um vaporizador de combustível e de umidificação da membrana. Outra aplicação em fase de avaliação para a DMFC é a automotiva, principalmente por eliminar a necessidade do reformador e, assim, simplificar o processo de produção de energia elétrica e aumentar a eficiência energética total do sistema.

Como já mencionado, as DMFCs encontram-se em estágio de desenvolvimento incipiente em relação às PEMFC alimentadas por hidrogênio, sendo que os principais problemas relacionados a elas são o desempenho do catalisador e a permeação de metanol através da membrana polimérica. Todavia, o desempenho das DMFCs vem melhorando rapidamente, e elas já são competitivas com as baterias de Li mais avançadas, com a vantagem de poderem ser recarregadas facilmente.

10.4.8 CaC de Etanol Direto (DEFC)

O combustível etanol apresenta vantagens em relação ao metanol, tais como menor toxidez e maior facilidade de ser obtido de forma renovável a partir de biomassa. Estudos iniciais indicaram que a permeabilidade do etanol através do eletrólito polimérico é baixa, o que o torna promissor para alimentação direta de PEMFC. Por outro lado, a cinética de oxidação do etanol é mais lenta que a do metanol, implicando a geração de sobrepotencial anódico ainda maior que no caso do metanol. Essas CaCs ainda estão em estágio de desenvolvimento laboratorial.

10.5 SISTEMAS À BASE DE CACS[47]

Sistemas à base de CaCs que utilizam as muitas tecnologias descritas anteriormente têm sido testados em aplicações móveis e estacionárias por todo o mundo, demonstrando muitas vantagens com relação aos sistemas convencionais. A figura 16 mostra um esquema geral de sistema à base de CaCs em que são destacados os componentes principais. No esquema

[47] Aldabó (2004), Severino (2008) e Reis (2003).

mostrado, os principais componentes são o processador do combustível, a pilha de células e o condicionador de potência, apresentados a seguir.

10.5.1 Processador de Combustível

Antes de ser introduzido na célula, o combustível deve passar por um processo de limpeza, cuja função é retirar todas as impurezas, como o enxofre, a amônia e, às vezes, o monóxido de carbono, que, uma vez em contato com os elementos da célula, podem contaminá-los, prejudicando o desempenho da CaC e reduzindo a vida útil dela.

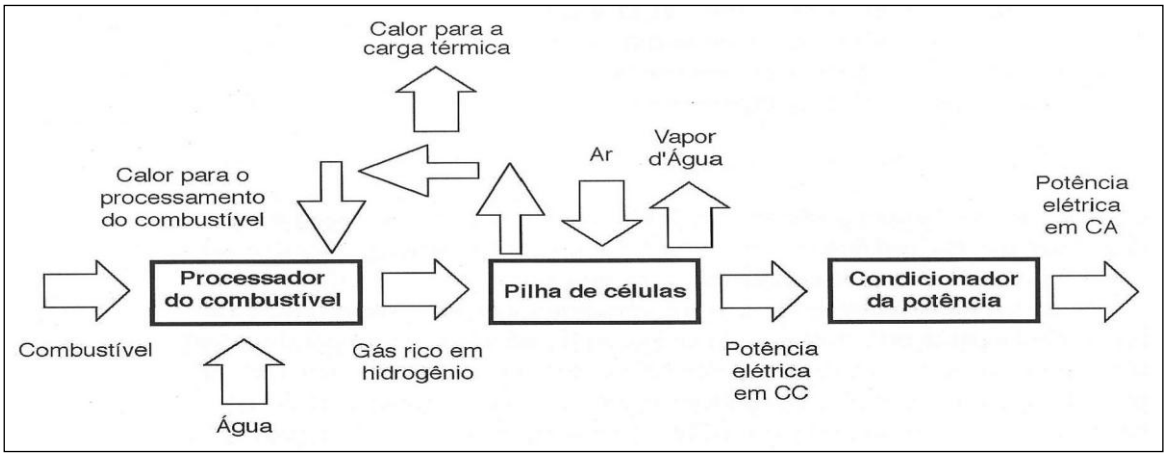


Figura 16: Esquema Geral de Sistema à Base de CaCs.
Fonte: REIS, 2003.

O processador do combustível também é o responsável pelo processo em que se realiza a reforma catalítica a vapor, que é a reação dos hidrocarbonetos existentes no combustível com vapor d'água, produzindo o hidrogênio livre que participará da reação eletroquímica no interior da célula. Nas CaCs que operam a temperaturas elevadas (MCFCs e SOFCs), o processo de reforma catalítica do combustível é realizado no interior da própria célula, eliminando a necessidade de um reformador em separado, caracterizando a reforma interna do combustível.

É claro que as CaCs que utilizam diretamente o gás H_2 ou um gás rico em hidrogênio usufruem da vantagem de não necessitarem realizar a reforma do combustível.

10.5.2 Pilha de células

A pilha de células indicada no esquema pode ser uma CaC completa, conforme descrição anterior, ou um conjunto de CaCs formado para a obtenção de um resultado coletivo com maior potência.

10.5.3 Condicionador de Potência

É o conjunto de equipamentos que converte a energia em CC gerada pela CaC para a forma de corrente alternada (CA), normalmente trifásica, a ser utilizada pelas cargas elétricas. Sendo assim, o condicionador de potência é constituído principalmente por inversores estáticos CC/CA.

10.5.4 O Hidrogênio como Combustível das CaCs[48]

O hidrogênio é o combustível básico utilizado nas CaCs, seja na forma pura ou na forma derivada de outros combustíveis, tais como os hidrocarbonetos, os álcoois e o carvão. Nas CaCs abastecidas com H_2, as reações eletroquímicas que se processam são bem simples, não produzindo substâncias derivadas do carbono (CO e CO_2), do enxofre (SO_2) ou do nitrogênio (NO_x), potenciais agentes contaminadores dos componentes internos das CaCs.

O hidrogênio como combustível exerce o importante papel de transportador de energia, proporcionando o armazenamento e a transmissão da energia por meio de linhas de dutos ou pelo seu armazenamento em recipientes adequados, com pressão compatível com a necessária ao consumo. Além disso, trata-se de um combustível poderoso: o poder calorífico do hidrogênio é de cerca de 120 MJ/kg (28.700 kcal/kg), enquanto o da gasolina é de cerca de 43,5 MJ/kg e o do metanol, de 20,1 MJ/kg.

O hidrogênio tem o potencial para ser o combustível menos poluidor. Entre os vários transportadores de energia que podem ser derivados de fontes renováveis, somente o hidrogênio e a eletricidade poderiam eliminar completamente as emissões prejudiciais no ponto de uso — algumas outras opções, como o metanol derivado da biomassa e utilizado em CaCs, poderiam aproximar-se dessa meta. Se o hidrogênio for produzido por meio de recursos renováveis, não há geração de gases-estufa ou outros poluentes na produção e no uso da energia.

[48] Aldabó (2004), Severino (2008) e Reis (2003).

É possível produzir hidrogênio eficientemente a partir de várias fontes renováveis disponíveis, usando-se métodos como, por exemplo, a eletrólise da água, em que a energia elétrica requerida para o processo pode ser fornecida por meio de geração eólica, hidrelétrica, solar fotovoltaica, gaseificação da biomassa, entre outras. A diversidade de fontes primárias poderá atribuir ao hidrogênio o papel de transportador universal de energia.

Cabe ressaltar que a maneira mais tradicional de se produzir hidrogênio puro ou com grau de pureza elevado é pela eletrólise da água, mediante a utilização de uma fonte externa de energia, em processo que se dá de modo exatamente inverso ao processo de geração de eletricidade nas CaCs.

10.5.5 Sistemas Móveis e Estacionários[49]

Os sistemas móveis à base de CaCs caracterizam-se principalmente pela constituição compacta, com as células operando com elevadas densidades de corrente. Esses sistemas, comumente à base de PEMFCs, são utilizados em substituição aos tradicionais motores de combustão interna, com muitas vantagens, entre as quais se incluem a elevada eficiência e a ausência de emissão de gases do efeito estufa.

Já os sistemas estacionários à base de CaCs caracterizam-se principalmente pela capacidade de geração de energia elétrica em local próximo à carga, garantindo, desse modo, vantagens incluídas nas já descritas para a GD no capítulo anterior. Desse modo, eles constituem casos particulares de GD, podendo ter as seguintes aplicações, entre outras: **(a)** geração de energia nas dependências do consumidor, que foi justamente a aplicação que deu visibilidade à tecnologia das CaCs, tornando-a comercialmente disponível desde o início dos anos 90 do século XX, com PAFCs de até 200 kW; **(b)** geração de energia conectada à rede de distribuição constituindo microrrede, conforme conceito apresentado no capítulo anterior; **(c)** geração concomitante de energia elétrica e calor, que pode ser utilizado para produzir eletricidade, para a produção de água quente ou para o abastecimento de sistemas de condicionamento de ar frio ou quente, muito empregado por hospitais, hotéis e outros estabelecimentos comerciais; ou **(d)** geração de energia em operação combinada com turbogeradores a gás.

[49] Reis (2003), Severino (2008) e Tolmasquim (2003).

As principais aplicações estacionárias de pequeno porte, de até 10 kW, são para a geração de energia elétrica para uso residencial, sistemas do tipo *no-breaks* e sistemas remotos. Nesses casos, a PEMFC é a mais adequada e pode ser alimentada com H_2 armazenado ou produzido a partir da reforma a vapor do propano, do metanol ou do gás natural. Este último combustível pode ser a opção preferencial para uso residencial quando já existe a rede para a distribuição dele. O calor residual dos sistemas residenciais pode ser aplicado para o aquecimento de água e ambientes, aumentando a eficiência energética das residências. As SOFCs também podem ser utilizadas para aplicações estacionárias de pequeno porte, apresentando vantagem competitiva com relação às PEMFCs quando se considera também a co-geração de calor.

Segundo Tolmasquim (2003), as aplicações estacionárias de médio porte, de 10 kW a 50 kW, e de grande porte, acima de 50 kW, podem ser atendidas com o uso de PEMFCs, PAFCs, MCFCs e SOFCs. Demandas da ordem de megawatts podem ser supridas por sistemas compostos por combinação de várias CaCs com potências individuais de 200 kW a 250 kW.

Uma vez que se trata de tecnologias novas, com diferentes estágios de desenvolvimento, os custos das células ainda variam muito de uma tecnologia para outra e de um fabricante para outro. Tolmasquim (2003) apresenta custos máximos da ordem de US$ 3.000/kW a US$ 4.000/kW para PEMFCs e SOFCs de potências variadas, considerando custos projetados para os primeiros produtos comerciais. Isso significa a expectativa de que, com os produtos plenamente desenvolvidos e com escala de produção, os custos serão bastante reduzidos.

10.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Brasil, parte relevante da população ainda não dispõe de suprimento de energia elétrica, fato que torna a discussão acerca desse tema muito importante.

Nos dias de hoje, o atendimento a essa demanda pode ser feito por meio da utilização de GD, que pode ser implementada com base em muitas fontes primárias de energia e muitas tecnologias, associadas ou não.

Considerando essa enorme diversidade e que o escopo deste trabalho restringe-se à abordagem de fontes e tecnologias de GD para atendimento a comunidades isoladas, sem possibilidade de alimentação elétrica por conexão a rede elétrica de distribuição existente, limitou-se a análise pela consideração da necessidade de se minimizarem os custos de geração. Isso conduziu à exploração de fontes que utilizem recursos naturais renováveis abundantes e gratuitos, como é o caso, em muitas regiões do Brasil, da radiação solar e da água.

Sendo assim, neste trabalho, foram apresentadas as principais características dos sistemas de geração fotovoltaica e de geração a partir de células a combustível, usuárias, respectivamente, da radiação solar e do gás hidrogênio obtido por meio da hidrólise da água, mostrando-se e justificando-se a relevância deles para a atualidade do setor de energia elétrica no Brasil e no mundo, tendo em vista a real possibilidade de sua utilização como fontes de GD.

REFERÊNCIAS

ALDABÓ, Ricardo. *Célula combustível a hidrogênio*: fonte de energia da nova era. São Paulo: Artliber, 2004.

_____. *Energia solar*. São Paulo: Artliber, 2002.

ALVES FILHO, João. *Matriz energética brasileira*: da crise à grande esperança. Rio de Janeiro: Mauad, 2003.

DOE – U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). *Solar Energy Technologies Program*. Disponível em: <www.eere.energy.gov/solar>. Acesso em: 2 de Junho de 2007.

ELECTROCELL – Grupo Electrocell Células a Combustível. Disponível em: <www.electrocell.com.br/oqueeacc_pt.htm>. Acesso em: 26 de Maio de 2008.

EL-KHATTAM, W; SALAMA, M.M.A. Distributed generation technologies, definitions and benefits. In: *Electric Power Systems Research*, Elsevier Science, Oxford, UK, v. 71, n. 2, p. 119–128, 2004.

FARRET, Felix Alberto. *Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica*. Santa Maria: UFSM, 1999.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin. *Energia e meio ambiente*. Tradução técnica de Flávio Maron Vichi e Leonardo Freire de Mello. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. Tradução da 3. ed. norte-americana.

IEA – International Energy Agency. *IEA Energy Statistics.* Disponível em: <www.iea.org>. Acesso em: 4 de Dezembro de 2005.

_____. *Key world energy statistics 2007.* Disponível em: <www.iea.org>. Acesso em: 24 de Maio de 2008a.

_____. *PVPS annual report*. Disponível em: <www.iea-pvps.org>. Acesso em: 10 de Maio de 2008b.

LABOURET, Anne *et al*., *Cellules solaires*: les bases de l'énergie photovoltaïque. 4ème ed. Paris: Dunod, 2005.

LORA, Electo Eduardo Silva; HADDAD, Jamil (Coord.). *Geração distribuída*: aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

MME – Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME, 2008. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 20 de Maio de 2008a.

_____. *Balanço energético nacional (BEN) – 2003*. Brasília: MME, 2007. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 20 de Maio de 2007a.

_____. *Balanço energético nacional (BEN) – 2006*. Brasília: MME, 2007. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 20 de Maio de 2007b.

_____. *Balanço energético nacional (BEN) – 2007*. Brasília: MME, 2008. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 24 de Maio de 2008b.

PALZ, Wolfgang. *Energia solar e fontes alternativas*. Tradução de Noberto de Paula Lima. Curitiba: Hemus, 2002.

PORTALH2. Disponível em: <www.portalh2.com.br>. Acesso em: 26 de Maio de 2008.

REIS, Lineu Belico dos. *Geração de energia elétrica*: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade. 3. ed. Barueri: Manole, 2003.

REIS, Lineu Belico dos; SILVEIRA, Semida (Org.). *Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável*: introdução de uma visão multidisciplinar. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2001.

RODRÍGUEZ, Carlos Roberto Cervantes. *Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída*: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos)–Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RÜTHER, Ricardo. *Edifícios solares fotovoltaicos*: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: UFSC: LABSOLAR, 2004.

RÜTHER, Ricardo; LIVINGSTONE, J. Amorphous and crystalline silicon solar modules: choices of technologies. In: CONFERÊNCIA SOLAR'93, Perth, Australia. **Anais**... Perth: Australian and New Zealand Solar Energy Society, 1993.

SCHEER, Hermann. *Economia solar global*: estratégias para a modernidade ecológica. Rio de Janeiro: CRESESB: CEPEL, 2002.

SEVERINO, Mauro Moura. *Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas da Amazônia*. 2008. 335 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SHAYANI, Rafael Amaral. *Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células*. 2006. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

TESTER, Jefferson W. et al. *Sustainable energy*: choosing among options. Cambridge: MIT Press, 2005.

TIBA, Chigueru; FRAIDENRAICH, Naum; BARBOSA, Elielza Moura de Souza. *Instalação de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água*: texto para curso de instalador de sistemas fotovoltaicos. 2. ed. Recife: UFPE, 1999.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiommno (Coord.). *Geração de energia elétrica no Brasil*. Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2005.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiommno (Org.). *Fontes renováveis de energia no Brasil*. Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2003.

WALTER, Arnaldo. Fomento à geração elétrica com fontes renováveis de energia no meio rural brasileiro: barreiras, ações e perpectivas. In: *Encontro de energia no meio rural* (AGRENER), An. 3, [S.l], 2000. Disponível em: <www.proceedings.scielo.br/scielo.php>. Acesso em: 2 de Maio de 2007.

WIKIPEDIA: the free encyclopedia. Disponível em: <www.en.wikipedia.org>. Acesso em: 6 de Abril de 2007.

WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Disponível em: <www.pt.wikipedia.org>. Acesso em: 30 de Abril de 2008.